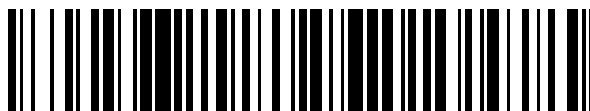


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 438 219**

51 Int. Cl.:

**G05B 19/4093** (2006.01)

**G05B 19/41** (2006.01)

**B29C 70/54** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.11.2006 E 06023218 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2013 EP 1785795**

54 Título: **Método de generación de pasos de cinta y aparato para programar una máquina de estratificación de cinta compuesta**

30 Prioridad:

**09.11.2005 US 269834**

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

**16.01.2014**

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)  
100 NORTH RIVERSIDE PLAZA  
CHICAGO IL 66066-2016, US**

72 Inventor/es:

**DRUMHELLER, MICHAEL;  
KLEIN, FREDERIK W. y  
JONES, ALAN K.**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 438 219 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**

Método de generación de pasos de cinta y aparato para programar una máquina de estratificación de cinta compuesta

5 La presente invención se refiere en general a la fabricación de piezas compuestas. Más particularmente, la presente invención se refiere a la generación de definiciones de pasos de cinta para su uso en programas de piezas compuestas por control numérico por ordenador para máquinas de estratificación de cinta compuesta.

10 Los materiales compuestos se han utilizado cada vez más en una variedad de industrias, incluyendo las industrias de la automoción, marinas y aeroespacial. En algunos casos, se pueden formar piezas compuestas utilizando máquinas de aplicación de materiales compuestos automatizadas, como máquinas de estratificación de cinta compuesta o máquinas de colocación de fibras compuestas.

15 Algunas máquinas de aplicación de material compuesto existentes, por ejemplo una máquina de estratificación de cinta plana (FTLM, Flat Tape Lamination Machine) o una máquina de estratificación de cinta contorneada (CTLM, Contoured Tape Lamination Machine) puede ser capaz de producir piezas compuestas planas o cuidadosamente contorneadas aplicando tiras relativamente anchas de cinta compuesta sobre superficies de herramienta generalmente horizontales o verticales, como por ejemplo un mandril. Además, algunas máquinas de estratificación de cinta pueden ser capaces de aplicar tiras relativamente delgadas, o "estopas", de cinta compuesta sobre una superficie contorneada más compleja, incluyendo superficies generalmente cilíndricas o esféricas.

20 Para producir de manera más eficiente piezas compuestas relativamente grandes, incluyendo secciones del fuselaje de aviones, se ha concebido una máquina de aplicación de material compuesto multi-cabezal de alta velocidad. Tal como se ha concebido, la máquina de aplicación de material compuesto multi-cabezal debería ser capaz de fabricar una amplia variedad de piezas compuestas, como mástiles planos, cargas para largueros, revestimiento para las alas y secciones del fuselaje, así como piezas compuestas en otras industrias, como las industriales de la automoción, marina, de vehículos industriales y de estructuras arquitectónicas prefabricadas.

30 El documento US-A-4,760,965 describe un método de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1.

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, según la reivindicación 1 se proporciona un método implementado por ordenador para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de una pieza compuesta puede incluir aproximar una superficie contorneada con un plano de referencia, establecer una correlación entre el límite de una capa de la superficie contorneada y un límite de capa de referencia en el plano de referencia y establecer una correlación con un límite de cinta de referencia en el plano de referencia.

40 De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, producto de programa de ordenador para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de pieza compuesta, que incluye medios legibles por ordenador codificados con instrucciones configuradas para ser ejecutadas por un procesador para llevar a cabo unas operaciones predeterminadas, que pueden incluir aproximar una superficie contorneada con un plano de referencia, establecer una correlación entre el límite de una capa de la superficie contorneada y un límite de capa de referencia en el plano de referencia, y establecer una correlación entre un límite de cinta de la superficie contorneada y un límite de cinta de referencia en el plano de referencia. Además, las operaciones predeterminadas pueden incluir definir un borde de cinta basándose al menos en parte en una intersección de referencia del límite de capa de referencia y el límite de cinta de referencia.

50 De acuerdo con otro aspecto más de la presente invención, el generador de pasos de cinta para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de pieza compuesta puede incluir un parametrizador de superficie de referencia configurado para aproximar una superficie contorneada con una superficie de referencia, establecer una correlación entre un límite de capa de la superficie contorneada y un límite de capa intermedia en la superficie de referencia, y establecer una correlación entre un límite de cinta de la superficie compuesta y un límite de cinta intermedia de la superficie de referencia. El generador de pasos de cinta puede incluir además un instanciador de plano de referencia configurado para aproximar la superficie de referencia con un plano de referencia, establecer una correlación entre el límite de capa intermedia y un límite de capa de referencia en el plano de referencia, y establecer una correlación entre el límite de cinta intermedia y un límite de cinta de referencia en el plano de referencia. Además, el generador de pasos de cinta puede incluir un delimitador de pasos de cinta configurado para definir un borde de cinta basándose al menos en parte en una intersección de referencia del límite de capa de referencia y el límite de cinta de referencia.

60 Se han remarcado de un modo bastante amplio ciertas realizaciones de la invención para que la descripción detallada de las mismas del presente documento pueda comprenderse mejor, y para que la presente contribución al estado de la técnica se pueda apreciar mejor. Existen, por supuesto, realizaciones adicionales de la invención que se describirán más abajo y que forman la materia de las reivindicaciones adjuntas.

65

A este respecto, antes de explicar al menos una realización de la invención con detalle, se debe entender que la invención no está limitada en su aplicación a los detalles de construcción y a las disposiciones de los componentes establecidas en la siguiente descripción o ilustradas en las figuras. La invención admite realizaciones adicionales a aquellas descritas y ser llevada a la práctica de diferentes modos. También, se debe entender que la fraseología y la terminología utilizada en el presente documento, así como en el resumen, son para la descripción y no deben interpretarse como limitantes.

Así, aquellos expertos en la materia apreciarán que la concepción en la que se basa esta descripción se podría utilizar como una base para el diseño de otras estructuras, métodos y sistemas para llevar a cabo los diferentes propósitos de la presente invención. Es importante, por tanto, que las reivindicaciones se consideren como incluyentes de tales construcciones equivalentes siempre que éstas no se aparte del ámbito de la presente invención.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La FIGURA 1 es un diagrama de bloques que ilustra un generador de pasos de cinta de un tipo adecuado para llevar a cabo las funciones de una realización de la invención.

La FIGURA 2 es una vista en perspectiva que ilustra una pieza compuesta grande y generalmente cilíndrica que presente pasos de cinta que pueden ser definidas por una realización preferida de la invención.

La FIGURA 3 es una representación esquemática de funciones de correlación entre una superficie contorneada y un plano de referencia.

La FIGURA 4 es una representación esquemática de funciones de correlación entre una superficie contorneada, una superficie de referencia y un plano de referencia.

La FIGURA 5 es una vista en sección transversal de una superficie contorneada que comprende dos superficies parciales superpuestas sobre una superficie de referencia.

La FIGURA 6 es una representación esquemática funciones de correlación entre una superficie contorneada y un plano de referencia que incluye singularidades.

La FIGURA 7 es una vista en perspectiva que ilustra una pieza compuesta grande y generalmente cilíndrica que presenta un límite de capa compuesto y un límite de cinta compuesto a lo largo de un camino de herramienta.

La FIGURA 8 es una representación esquemática de una imagen de un límite de capa y un límite de cinta en un plano de referencia.

La FIGURA 9 es una representación esquemática de una imagen de un paso de cinta en un plano de referencia.

La FIGURA 10 es un diagrama de flujo que ilustra pasos que pueden seguirse para generar pasos de cinta de acuerdo con una realización del método o proceso.

La FIGURA 11 es un diagrama de flujo que ilustra los pasos que se pueden seguir para parametrizar una superficie en el método de la FIGURA 10.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA

Una realización de acuerdo con la presente invención proporciona un generador de paso de cinta compuesta que puede producir definiciones de paso de cinta para su uso en la programación de una máquina e aplicación de material compuesto de control numérico por ordenador (CNC, Computer Numerical Control) multi-cabezal o de cabezal simple. El generador de pasos de cinta es capaz de producir definiciones de pasos de cinta compuesta para una amplia variedad de piezas compuestas grandes y complejas, incluyendo piezas compuestas relativamente planas, contorneadas o generalmente cilíndricas, o piezas compuestas dotadas de superficies contorneadas relativamente complejas.

El generador de pasos de cinta puede incluir un parametrizador de cinta de referencia que puede realizar una correlación entre una superficie contorneada real, por ejemplo una superficie de herramienta de fabricación compuesta o una superficie de pieza compuesta, y una superficie de referencia paramétrica. El generador de pasos de cinta también puede incluir un instanciador de plano de referencia que puede establecer una correlación entre la superficie de referencia y un plano de referencia. Por tanto, el generador de pasos de cinta puede realizar en última instancia una correlación entre la superficie contorneada real y un plano de referencia paramétrico, y al hacerlo, el generador de pasos de referencia puede reducir un análisis tridimensional relativamente complejo de la topología de la superficie contorneada a un caso de un análisis bidimensional o plano más sencillo de calcular.

Además, el generador de pasos de cinta puede incluir un trazador de pasos de cinta que puede trazar un contorno virtual de un segmento de cinta, o límite de cinta, basándose en un camino de herramienta definido sobre la superficie contorneada, así como un correlacionador de límites que puede establecer una correlación entre el límite de cinta y un límite de capa definido en la superficie contorneada con el plano de referencia. El generador de pasos de cinta puede incluir además un localizador de intersecciones que puede analizar los límites del plano de referencia para identificar intersecciones del límite de capa y el límite de cinta, que puede utilizarse para definir cortes de cinta y especificar requisitos de posicionamiento del cabezal de aplicación de material compuesto de la máquina de aplicación de material compuesto. Además, el generador de pasos de cinta puede incluir un delimitador de pasos de cinta que puede determinar si un punto en el plano de referencia queda o no dentro de una curva cerrada, y por

tanto puede determinar qué puntos del plano de referencia son parte de el paso de la cinta. Además, el generador de pasos de cinta puede incluir un transformador de pasos de cinta que puede establecer una correlación entre el paso de cinta definida y la superficie contorneada. Por tanto, el generador de pasos de cinta puede definir los pasos de cinta individuales que se deben aplicar para cubrir cada capa.

La invención se describirá a continuación haciendo referencia a las figuras, en las que números de referencia similares denotan piezas similares. Una realización de acuerdo con la presente invención proporciona un generador de pasos de cinta compuesta que puede producir definiciones de pasos de cinta para su uso en la creación de un programa de piezas compuestas para controlar una máquina de aplicación de material compuesto CNC, como por ejemplo una máquina de estratificación de cinta compuesta o una máquina de aplicación de cinta, que tiene un único cabezal de aplicación de material compuesto, o que tiene múltiples cabezales de aplicación de material compuesto. Por ejemplo, una realización de la presente invención puede ser utilizada en conjunto con el método descrito en la solicitud de patente pendiente titulada "Multihead composite material application machine programming method and apparatus for manufacturing composite structures", presentada por Hagen, et al el 9 de noviembre de 2005.

La FIGURA 1 ilustra una realización representativa de un generador 10 de pasos de cinta, incluyendo un procesador 12, una memoria 14, un parametrizador 16 de superficie de referencia, un instanciador 18 de plano de referencia, un trazador 20 de límite de cinta, un correlacionador 22 de límites, un localizador 24 de intersecciones, un delimitador 26 de pasos de cinta, un transformador 27 de pasos de cinta, y un dispositivo 28 de entradas/salidas (E/S), todos los cuales están interconectados por medio de un enlace 30 de datos. El procesador 12, la memoria 14 y el dispositivo 28 de entradas/salidas pueden ser parte de un ordenador general, como por ejemplo un ordenador personal (PC), un servidor, un ordenador central, un asistente digital personal (PDA, Personal Digital Assistant), o alguna combinación de los mismos. El resto de componentes pueden incluir código de programación, como código fuente, código objeto o código ejecutable, almacenado en un medio legible por ordenador que puede cargarse en la memoria 14 y ser procesado por el procesador 12 para llevar a cabo las funciones deseadas del generador 10 de pasos de cinta.

Durante el funcionamiento, el generador 10 de pasos de cinta puede recibir una definición de superficie de herramienta de fabricación y múltiples definiciones de capas compuestas asociadas con una definición de pieza compuesta, por ejemplo en un formato de diseño asistido por ordenador (CAD, Computer-Assisted Design) o en un formato convertido desde una definición de diseño de pieza compuesta CAD para que sea compatible con el generador 10 de pasos de cinta. Además, el generador 10 de pasos de cinta puede además recibir un conjunto de caminos de herramienta independientes de la máquina definidos a lo largo de la superficie de herramienta de fabricación o a lo largo de una superficie de capa compuesta, que los cabezales de aplicación de material compuesto pueden seguir para aplicar el material compuesto a lo largo de la superficie de la herramienta de fabricación, o a lo largo de una superficie de capa previa, para formar una pieza compuesta. Por tanto, por ejemplo, el área superficial de cada capa puede rellenarse con caminos que están separados por la anchura nominal de una cinta compuesta estándar dentro de una tolerancia que cumple con las especificaciones o límites de hueco o superposición.

Por ejemplo, la FIGURA 2 ilustra una herramienta 32 de fabricación, o mandril, para una pieza compuesta grande y generalmente cilíndrica con ocho caminos 34 de herramienta representativos diseñados de acuerdo con una dirección generalmente horizontal a través de la superficie de la herramienta 32 de fabricación. La FIGURA 2 también ilustra un primer límite 36 de capa y un segundo límite 38 de capa. Ocho pasos 40 de cinta compuesta contiguas, que corresponden a los caminos 34 de herramienta, están delineados dentro del primer límite 36 de capa. Similarmente, siete pasos 42 de cinta compuesta contigua están delineadas dentro del segundo límite 38 de capa, incluyendo un paso 44 de cinta no estándar que tiene una anchura que es menor que la distancia entre cada uno de los pares adyacentes de los caminos 34 de herramienta, o la anchura de una cinta compuesta nominal.

Como ejemplo, una máquina de estratificación de cinta compuesta puede tener uno o más cabezales de aplicación de material compuesto fijados a un carro de herramienta y configurados para aplicar cinta compuesta que tiene una anchura estándar o nominal de tres pulgadas, seis pulgadas, o cualquier otra anchura adecuada. La máquina de estratificación de cinta compuesta puede incluir además un cabezal de aplicación de material compuesto que aplica una tira o múltiples tiras de cinta compuesta con una anchura no estándar. Por ejemplo, una máquina de estratificación de cinta compuesta multi-cabezal representativa puede incluir uno o más cabezales estándar que aplican tiras de una anchura nominal de tres pulgadas de cinta compuesta, así como uno o más cabezales especializados que aplican tiras de cinta compuesta de anchura no estándar, como por ejemplo tiras de una anchura de un octavo de pulgada o un cuarto de pulgada, o "estopas". Además, un cabezal especializado puede tener la capacidad de aplicar múltiples tiras no estándar hasta una anchura agregada igual a la anchura nominal de la cinta, por ejemplo, hasta veinticuatro estopas de cinta compuesta de un octavo de pulgada en una máquina que tiene una anchura nominal de cinta de tres pulgadas.

Aunque los caminos 34 de herramienta y los pasos 40, 42 de cinta mostradas en la FIGURA 2 son generalmente horizontales, o paralelas el eje de la herramienta 32 de fabricación (como referencia en este ejemplo, la orientación de la fibra de cero grados), capas adicionales pueden tener otras orientaciones de fibra, como noventa grados o cuarenta y cinco grados, o cualquier orientación de fibra adecuada para satisfacer los requisitos de diseño de una

pieza compuesta.

5 El generador 10 de pasos de cinta puede posteriormente definir un conjunto de pasos 40, 42, 44 de cinta que corresponden a los caminos de herramienta independientes de la máquina y a las capas de la pieza compuesta. Esto es, el generador 10 de pasos de cinta puede definir una serie de cortes y requisitos de actuación del cabezal de aplicación de material compuesto, como las ubicaciones superior e inferior del cabezal de aplicación de material compuesto y las ubicaciones de corte de cinta a lo largo de cada camino de modo que sólo la parte del camino que queda dentro de los límites 36, 38 de la capa es realmente rellena con la cinta compuesta.

10 En una realización, el generador 10 de pasos de cinta puede implementar un sistema de coordenadas cartesiano, por ejemplo para producir piezas generalmente planas o contorneadas. En otras realizaciones, el generador de pasos de cinta puede implementar cualquier sistema de coordenadas adecuado, por ejemplo un sistema de coordenadas polar, como por ejemplo un sistema de referencia angular, por ejemplo, para producir piezas generalmente cilíndricas en una herramienta 28 de fabricación rotativa, un sistema de coordenadas circular, un sistema de coordenadas esférico; un sistema de coordenadas curvilíneo; o similares.

15 Como se muestra en la FIGURA 3, el generador 10 de pasos de cinta puede aproximar una superficie 46 contorneada real, como una forma de herramienta de fabricación real o una forma de pieza compuesta real, mediante una superficie de referencia paramétrica bidimensional (2D), o plano 48 de referencia. Una superficie paramétrica es una superficie cuyas coordenadas de los puntos que la conforman pueden ser definidas de manera precisa por medio de una ecuación, o por un conjunto de ecuaciones, que son funciones de dos variables independientes o parámetros.

20 El generador 10 de pasos de cinta puede desarrollar un algoritmo de correlación, o función  $g$ , que correlaciona la superficie 46 contorneada con el plano 48 de referencia. Así, la función de correlación,  $g$ , puede llevar a cabo la correlación de las coordenadas tridimensionales (3D) de la superficie 46 contorneada con las coordenadas planas del plano 48 referencia. Es decir, el generador 10 de pasos de cinta puede parametrizar la superficie contorneada, o en otras palabras, la función  $g$  puede asignar parámetros, por ejemplo, coordenadas planas, a cada punto definido sobre la superficie 46 contorneada.

25 Similarmente, el generador 10 de pasos de cinta puede desarrollar un algoritmo de correlación inversa, o función inversa,  $f$ , que correlaciona el plano 48 de referencia con la superficie 46 contorneada. En algunas realizaciones del generador 10 de pasos de cinta, la función  $f$  inversa puede determinarse primero, y la función  $g$  puede determinarse a partir de la función  $f$ . Esto es, la función de correlación  $g$  puede definirse como la inversa de la función  $f$ . En general, puede hacerse referencia a la función  $g$  como una parametrización de la superficie 46 contorneada, porque la función  $g$  asigna parámetros a cada punto de la superficie 46 contorneada.

30 Idealmente, las funciones  $f$  y  $g$  de correlación pueden establecer una correspondencia uno-a-uno entre los puntos de la superficie 46 contorneada y los puntos del plano 48 de referencia. En ese caso, la función  $g$  de correlación correlaciona exactamente un punto de la superficie 46 contorneada con exactamente un punto del plano 48 de referencia, y la función inversa  $f$  correlaciona exactamente un punto del plano 48 de referencia con exactamente un punto de la superficie 46 contorneada, para todos los puntos de la superficie 46 contorneada y del plano 48 de referencia.

35 Además, las funciones de correlación  $f$  y  $g$  deberían idealmente ser continuas a lo largo de las respectivas superficies. Esto significa que puntos vecinos en la superficie 46 contorneada se correlacionen con puntos vecinos en el plano 48 de referencia. Si las funciones de correlación  $f$  y  $g$  tienen una correspondencia uno-a-uno y son continuas, entonces todas las relaciones topológicas de la superficie 46 contorneada se conservarán cuando se correlacione con el plano 48 de referencia y viceversa. Finalmente, las funciones de correlación  $f$  y  $g$  también deberían poder calcularse de manera eficiente, de modo que el método se pueda utilizar en un programa de ordenador práctico.

40 En casos relativamente simples, como por ejemplo superficies casi planas o apenas curvadas, las funciones de correlación  $f$  y  $g$  pueden determinarse utilizando métodos convencionales. Por ejemplo, para una superficie casi plana, la proyección normal sobre un plano de referencia adecuado se puede implementar con éxito. Sin embargo, la proyección normal directa sobre un plano de referencia puede no ser suficiente en el caso de una superficie más compleja, por ejemplo, una superficie generalmente cilíndrica, ya que las funciones de correlación  $f$  y  $g$  resultantes no tendrán una correspondencia uno-a-uno.

45 Como ejemplo, si la superficie contorneada del fuselaje de un avión se proyectase directamente hacia abajo sobre el asfalto (el plano de referencia), ciertos puntos de las superficies superior e inferior del fuselaje quedarían proyectadas sobre un único punto en el suelo, ya que una línea vertical en general pasaría a través del fuselaje en dos lugares. Por tanto, la función de correlación resultante sería en el mejor de los casos una función dos-a-uno (al igual que sería la función de correlación inversa). Por tanto, para aproximar una superficie más compleja con una función de correlación que tenga una correlación uno-a-uno, se debe utilizar otro tipo de superficie de referencia.

5 Para resolver esta dificultad, el generador 10 de pasos de cinta puede dividir la tarea de aproximar la superficie 46  
 10 contorneada real con un plano 48 de referencia en dos módulos. Por ejemplo, como se muestra en la FIGURA 4, el  
 parametrizador 16 de superficie de referencia (ver FIGURA 1) puede aproximar la superficie 46 contorneada real con  
 una superficie 60 de referencia paramétrica tridimensional (3D), y el instanciador 18 de plano de referencia (ver  
 FIGURA 1) puede aproximar la superficie 50 de referencia con un plano 48 de referencia adecuado. Esto es, el  
 parametrizador 16 de superficie de referencia puede determinar las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  para  
 correlacionar la superficie 46 contorneada sobre la superficie 50 de referencia y viceversa, y el instanciador 18 de  
 plano de referencia puede determinar funciones de correlación  $g_2$  y  $f_1$  para correlacionar la superficie 50 de  
 referencia con el plano 48 de referencia y viceversa.

15 Por tanto, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede seleccionar una forma de superficie de referencia  
 relativamente simple en comparación con la de la superficie contorneada. En particular, el parametrizador 16 de  
 superficie de referencia puede seleccionar una forma de superficie de referencia que es suficientemente similar a la  
 20 forma general de la superficie 46 contorneada para retener la mayor parte de la geometría, y que puede definirse o  
 parametrizarse fácilmente, o al menos puede evaluarse de un modo razonablemente conveniente. Por ejemplo, en  
 algunas realizaciones del generador 10 de pasos de cinta, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede  
 seleccionar una superficie geométrica relativamente simple, como un cilindro, una esfera, un hemisferio o un cono  
 para aproximar la superficie 46 contorneada. Otras realizaciones pueden utilizar una combinación de tales  
 superficies para aproximar una superficie contorneada que no es suficientemente similar a una única superficie  
 paramétrica.

25 La ventaja principal de seleccionar una forma de superficie relativamente simple es que las funciones de correlación  
 $f$  y  $g$  resultantes requieren cálculos relativamente fáciles, o incluso triviales. Por tanto, la capacidad computacional  
 necesaria para soportar una realización del generador 10 de pasos de cinta puede reducirse significativamente en  
 comparación con algunos métodos analíticos alternativos.

30 En otras realizaciones del generador 10 de pasos de cinta, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede  
 seleccionar cualquier superficie paramétrica adecuada que pueda ser modelada por una función matemática, como  
 un hemisferio, un poliedro, un toro, una esferoide, una elipsoide, un paraboloido, una hiperboloide. Para algunas  
 superficies topológicamente cilíndricas, en una realización alternativa, el parametrizador 16 de superficie de  
 referencia puede seleccionar una superficie barrida que incluye, por ejemplo, una sección transversal constante  
 definida a lo largo de una espina longitudinal curvada para aproximarse a la superficie 46 contorneada.

35 En consecuencia, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede construir, o definir, la superficie 50 de  
 referencia basándose en la geometría de la superficie 46 contorneada. Es decir, el parametrizador 16 de superficie  
 de referencia puede desarrollar un algoritmo de correlación, o función  $g_1$ , que establece una correlación entre la  
 superficie 46 contorneada y la superficie 50 de referencia, que se muestra en la FIGURA 4. Similarmente, el  
 parametrizador 16 de superficie de referencia puede desarrollar un algoritmo de correlación inverso, o función  
 40 inversa  $f_2$ , que establece una correlación entre la superficie 50 de referencia y la superficie 46 contorneada.

45 En algunas realizaciones, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede definir las funciones de correlación  
 $g_1$  y  $f_2$  mediante la superposición de la superficie 46 contorneada sobre la superficie 50 de referencia y lanzando o  
 proyectando rayos normales a la superficie 50 de referencia. En otras realizaciones, el parametrizador 16 de  
 superficie de referencia puede lanzar rayos normales al eje de la superficie 50 de referencia. Por ejemplo, en el caso  
 en que la superficie 50 de referencia es un cilindro o una superficie de barrido con secciones transversales  
 circulares, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede proyectar rayos desde el eje del cilindro, o desde  
 el lomo de la superficie de barrido, hacia la superficie 50 de referencia. Similarmente, para una superficie de  
 50 referencia esférica, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede proyectar rayos desde el centro de la  
 esfera para obtener las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$ . En general, el parametrizador 16 de superficie de referencia  
 puede identificar los puntos correlacionados donde cada uno de los rayos normales corta la superficie 50 de  
 referencia y la superficie 46 contorneada para deducir las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$ . En algunas realizaciones,  
 la función de correlación  $f_2$  puede determinarse empíricamente, y la función de correlación  $g_1$  puede definirse como  
 la inversa de la función de correlación  $f_2$ .

55 Para superficies todavía más generales, en otra realización alternativa del generador 10 de pasos de cinta, el  
 parametrizador 16 de superficie de referencia puede construir una superficie de mejor ajuste y listel único con un  
 dominio de parámetro adecuado basándose en una muestra de la superficie 46 contorneada. En esta realización, el  
 parametrizador 16 de superficie de referencia puede definir las funciones  $g_1$  y  $f_2$  superponiendo la superficie 46  
 60 contorneada sobre la superficie de mejor ajuste y listel único y proyectando rayos normales desde la superficie 50 de  
 referencia. Sin embargo, los rayos deben proyectarse tanto en la dirección hacia dentro como en la dirección hacia  
 fuera desde la superficie 50 de referencia, ya que el listel puede estar dentro de la superficie 50 de referencia en  
 algunos puntos y fuera de la superficie de referencia en otros puntos. De nuevo, el parametrizador 16 de superficie  
 de referencia puede identificar los puntos correlacionados donde cada uno de los rayos normales corta la superficie  
 65 50 de referencia y la superficie 46 contorneada para obtener las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$ .

5 Sin embargo, cuando se proyectan rayos en ambas direcciones desde la superficie 50 de referencia, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede también identificar intersecciones extrañas de los rayos con un lado opuesto de la superficie contorneada. Por tanto, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede modificarse para aplicar un umbral limitante sobre la máxima distancia aceptable entre la superficie 50 de referencia y la superficie 46 contorneada, rechazando así las intersecciones de superficie extrañas.

10 Además, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede verificar que la proyección normal sobre la superficie 50 de referencia tiene una correspondencia uno-a-uno con la superficie 46 contorneada y que las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  son continuas, es decir, que las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  están unívocamente definidas sobre las respectivas superficies. Para conseguir esto, rayos normales de todos los puntos de la superficie 50 de referencia, o todos los puntos a lo largo de la superficie 50 de referencia, deben cortar cada uno un punto único de la superficie 46 contorneada. Por ejemplo, en el caso de un cilindro superpuesto aproximadamente de manera concéntrica como una superficie de referencia sobre el fuselaje de un avión, cualquier rayo normal proyectado desde el eje del cilindro cortaría la superficie del fuselaje en un único punto que es único de las intersecciones de todos los rayos normales que se pueden proyectar desde el eje del cilindro, lo que resulta en funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  uno-a-uno. En general, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede seleccionar la superficie 50 de referencia para que tenga una forma suficientemente similar a la superficie 46 contorneada de manera que las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  puedan tener una correspondencia uno-a-uno.

20 En algunos casos, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede realizar ajustes en las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  para establecer una correspondencia uno-a-uno. Por ejemplo, una definición de superficie CAD para la superficie 46 contorneada puede consistir en múltiples superficies parciales - incluso miles de superficies parciales - que conjuntamente definen la superficie 46 contorneada compleja. Un ejemplo de una definición de superficie que comprende dos superficies 52, 54 parciales se ilustra en la FIGURA 5. Además, algunas de las superficies parciales pueden superponerse inintencionadamente, como se ilustra mediante la superposición 56 de la punta superior de la superficie 54 parcial derecha sobre la punta superior de superficie 52 parcial izquierda en la FIGURA 5.

30 En este caso, cuando se proyecta un rayo 60, por ejemplo desde el eje 70 de la superficie 50 de referencia cilíndrica, pasando a través de un punto 62 de la superficie 50 de referencia en una dirección orientada hacia fuera normal a la superficie 50 de referencia, el rayo 60 puede cortar ambas superficies 52, 54 parciales. Por ejemplo, el rayo 60 puede cortar la superficie 52 parcial izquierda en el punto 64, y cortar la superficie parcial derecha en el punto 66, como se ilustra también en la FIGURA 5. En este caso, la función de correlación  $f_2$  no tiene una correspondencia uno-a-uno. Por tanto, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede ajustar la función de correlación  $f_2$  calculando una media ponderada de los múltiples puntos 64, 66 de intersección para establecer una correspondencia uno-a-uno.

40 En otros casos, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede realizar ajustes en las funciones correlación  $g_1$  y  $f_2$  para hacer que las funciones sean continuas. Por ejemplo, algunas de las superficies parciales de una definición de superficie CAD para la superficie 46 contorneada pueden estar separadas un hueco inintencionado, como se ilustra mediante el hueco 58 entre las puntas inferiores de las superficies 52, 54 parciales izquierda y derecha en la FIGURA 5. Es decir, la superficie 46 contorneada no está definida en todos los puntos. En este caso, cuando se proyecta un rayo 68, por ejemplo desde el eje 70 de la superficie 50 de referencia cilíndrica, pasando a través de un punto 72 sobre la superficie 50 de referencia en una dirección orientada hacia fuera normal a la superficie 50 de referencia, el rayo 68 puede no cortar ninguna de las superficies 52, 54 parciales, como se ilustra también en la FIGURA 5. En este caso, la función de correlación  $f_2$  no es continua. Por tanto, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede ajustar la función de correlación  $f_2$  interpolando entre las puntas de las superficies 52, 54 cercanas para deducir funciones continuas.

50 Sin embargo, la superficie 50 de referencia resultante no es una superficie plana, como es deseable para reducir el análisis de la superficie 46 contorneada a un problema matemático elemental. Así, como se ha mencionado anteriormente, el instanciador 18 de plano de referencia puede aproximar la superficie 50 de referencia con un plano 48 de referencia adecuado, como se muestra en la FIGURA 4. De acuerdo con la forma de la superficie 50 de referencia, el instanciador 18 de plano de referencia puede desenrollar, desplegar, o aplanar la superficie 50 de referencia para crear una superficie en 2D representativa, o plano 48 de referencia que corresponde a la superficie 50 de referencia. Por ejemplo, en el caso de una superficie 50 de referencia cilíndrica, el plano 48 de referencia puede ser rectangular, como se muestra en la FIGURA 4, de modo que el plano 48 de referencia pueda enrollarse de manera efectiva alrededor de la superficie 50 cilíndrica de referencia. Para otras formas de superficies de referencia, cualquier forma adecuada de plano de referencia que pueda representar con precisión la superficie 50 de referencia puede seleccionarse como plano 48 de referencia.

60 Como la superficie 50 de referencia se puede seleccionar par que sea una superficie paramétrica, el instanciador 18 de plano de referencia puede utilizar una ecuación paramétrica convencional, o conjunto de ecuaciones, para correlacionar la superficie 50 de referencia con el plano 48 de referencia. Por ejemplo, si la superficie 50 de referencia

se elige para que sea un cilindro y el plano 48 de referencia se elige para que sea un plano rectangular, como se muestra en la FIGURA 4,  $f_1$  se puede reducir a un mapa de coordenadas cilíndricas convencionales de acuerdo con la ecuación bien conocida:

$$f_1(u, v) = (u, \text{sen}(v), \text{cos}(v))$$

Por tanto, las funciones de correlación  $f$  y  $g$  que pueden correlacionar la superficie 46 contorneada con el plano 48 de referencia pueden ser sustituidas por, o descompuestas en, los dos pares de funciones  $f_1$  y  $f_2$  y  $g_1$  y  $g_2$ , que pueden producir en conjunto la misma correlación de la superficie 46 contorneada con el plano 48 de referencia. Por ejemplo, la función  $g_1$  puede aplicarse primero a la superficie 46 contorneada, después de lo cual la función  $g_2$  de correlación puede ser aplicada a la superficie 50 de referencia para correlacionar la superficie 46 contorneada con el plano 50 referencia. Igualmente, la función de correlación  $f_1$  puede aplicarse primero al plano 48 de referencia, después de lo cual se puede aplicar la función de correlación  $f_2$  a la superficie 50 de referencia para correlacionar el plano 50 de referencia con la superficie 46 contorneada.

Además, si cada una de las funciones de correlación  $f_1$  y  $f_2$  (o  $g_1$  y  $g_2$ ) tiene una correspondencia uno-a-uno, entonces por definición la correlación global  $f$  (o  $g$ ) entre la superficie 46 contorneada y el plano 48 de referencia tendrá también una correspondencia uno-a-uno. Además, si cada una de las funciones de correlación  $f_1$  y  $f_2$  (o  $g_1$  y  $g_2$ ) es continua, entonces por definición la correlación global  $f$  (o  $g$ ) entre la superficie 46 contorneada y el plano 48 de referencia también será continua.

Sin embargo, en algunos casos no es posible definir funciones de correlación  $f_1$  y  $f_2$  (o  $g_1$  y  $g_2$ ) que tengan una correspondencia uno-a-uno. Por ejemplo, una esfera cerrada no puede ser correlacionada sobre una superficie plana con una correspondencia uno-a-uno, incluso en principio (por motivos matemáticos fundamentales bien conocidos). Además, incluso cuando una correlación uno-a-uno es posible, como es el caso de la correlación de un cilindro o hemisferio sobre un plano, las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  que son deseables para una realización de la presente invención pueden no tener una correspondencia uno-a-uno a lo largo de toda la superficie.

Por tanto, el parametrizador 16 de superficie de referencia puede seleccionar una superficie 50 de referencia y el instanciador 18 de plano de referencia puede seleccionar un plano 48 de referencia que contiene singularidades, o regiones en las que las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  no tienen una correspondencia uno-a-uno o no son continuas. En particular, las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  pueden ser continuas y tener una correspondencia uno-a-uno en todos los puntos del plano 48 de referencia y la superficie 50 de referencia, con la excepción de un número limitado de singularidades aisladas, como la junta 74 de la superficie 50 de referencia cilíndrica y los bordes 76, 78 del plano de referencia de la FIGURA 6.

Por ejemplo, las singularidades pueden incluir ubicaciones en las que las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  correlacionan dos puntos, líneas o curvas en el plano 48 de referencia con un único punto, línea o curva de la superficie 50 de referencia, de tal modo que las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  no tienen una correlación uno-a-uno. Como ejemplo específico, en el caso de una superficie 50 de referencia que está representada por medio de coordenadas cilíndricas, como se muestra en la FIGURA 6, el borde 76 superior y el borde 78 inferior del plano 48 de referencia pueden correlacionarse con una única línea, o junta, sobre la superficie 50 de referencia. Similarmente, singularidades en la forma de postes pueden ser características de superficies 50 de referencia basadas en sistemas de coordenadas polares o esféricas.

Además, las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  pueden no ser continuas en una singularidad. Por ejemplo, dos puntos 80, 82, uno de los cuales está a cada lado de la junta 74 sobre la superficie 50 de referencia cilíndrica, pueden estar arbitrariamente cerca uno de otro, aunque los correspondientes puntos 84, 86 en el plano 48 de referencia con los que se correlacionan los puntos 80, 82 mediante  $g_2$  pueden estar cerca de bordes opuestos 76, 78 del plano 48 de referencia rectangular.

Para acomodar tales singularidades, el instanciador 18 de plano de referencia puede aislar de manera efectiva las porciones de curvas en el plano 48 de referencia que cruzan a través de las singularidades, como por ejemplo los bordes 76, 78 de los planos de referencia superior e inferior. Por ejemplo, el instanciador 18 de plano de referencia puede crear una definición por partes de una curva en el plano 50 de referencia, quedando la mayoría de las porciones curvas, o piezas, exclusivamente en el interior del plano 48 de referencia sobre el cual las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  son continuas y tienen una correspondencia uno-a-uno. A estas porciones curvas, o piezas, se puede hacer referencia como "segmentos curvos ordinarios". Además, el instanciador 18 de plano de referencia puede introducir un "segmento curvo virtual" 88 en el plano 48 de referencia para conectar un punto 90 en el cual la curva corta el borde 76 superior con un punto 92 en el que la curva corta el borde 78 inferior.

El segmento curvo virtual 88 puede funcionar como un marcador especial de cruce de junta, asociando los puntos 90, 92 correspondientes uno al otro. Realmente, los dos puntos 90, 92 pueden corresponder a un único punto 94 a lo largo de la junta sobre la superficie 3D de referencia, y el segmento virtual curvo 88 puede proporcionar la continuidad requerida en las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  entre la superficie 46 de referencia y el plano 48 de



referencia. Esto es, el segmento virtual curvo 88 es un segmento virtual curvo abstracto que puede concebirse como completamente dentro de la singularidad, correspondiendo al punto 94 donde la curva cruza la junta 74. Por tanto, cada curva que cruza la junta 74 sobre la superficie 50 de referencia puede ser sustituida por una combinación de segmentos de curva ordinarios y virtuales en el plano 48 de referencia.

Interpretándolo literalmente, el segmento curvo virtual 8 se correlacionaría con un círculo 96 alrededor de la circunferencia de la superficie de referencia cilíndrica, como se muestra en la FIGURA 6. Sin embargo, como convención, el instanciador 18 de plano de referencia puede modificar las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  para correlacionar el segmento curvo virtual 88 en el plano 48 de referencia con la imagen común, o punto 94, de los dos puntos extremos del segmento curvo virtual 88 (puntos 90, 92). Además, en el momento en que el segmento 88 curvo virtual es creado en el plano 50 de referencia, el instanciador 18 de plano de referencia puede marcar el segmento curvo virtual 88 de modo que el segmento curvo virtual 88 pueda identificarse posteriormente y dale un tratamiento especial durante el análisis.

Una vez la aproximación 2D, o plano 48 de referencia, se ha definido para la superficie 46 contorneada, se pueden llevar a cabo en el plano 48 de referencia análisis topológicos relativos a la superficie 46 contorneada, incluyendo la definición de los pasos 40, 42 de cinta (ver la FIGURA 2). Después, el resultado de los análisis, incluyendo las definiciones de los pasos de cinta, pueden volver a correlacionarse sobre la superficie 46 contorneada.

Como se ilustra en la FIGURA 7, el trazador 20 de límites de cinta (ver FIGURA 1) puede trazar un límite 100 de cinta tentativo sobre la superficie 46 contorneada. El límite 100 de cinta puede basarse en un camino 102 de herramienta correspondiente. Por ejemplo, el límite 100 de cinta puede trazarse con una anchura de cinta nominal con una línea central que sigue el camino 102 de la herramienta. El paso de cinta puede definirse entonces basándose en las intersecciones 104 del límite 100 de cinta con un límite 106 de capa correspondiente.

Para que el análisis de la definición de el paso de cinta se lleve a cabo en el plano 48 de referencia, donde los cálculos requeridos pueden ser significativamente menos complejos que los cálculos equivalentes sobre la superficie 46 contorneada, el correlacionador 22 de límites (ver la FIGURA 1) puede correlacionar el límite 100 de cinta y el límite 106 de capa con el plano 48 de referencia utilizando las funciones de correlación  $g_1$  y  $g_2$ , o la función equivalente  $g$ . Por tanto, el correlacionador 22 de límites puede crear una imagen 2D en el plano 48 de referencia, por ejemplo, la imagen 108 mostrada en la FIGURA 8. La imagen 108 puede incluir un límite 110 de cinta de referencia y un límite 112 de capa de referencia.

Además, el localizador 24 de intersección (ver la FIGURA 1) puede analizar la imagen 108 para determinar las posiciones de las intersecciones 114 de referencia del límite 110 de cinta de referencia con el límite 112 de capa de referencia. Como el análisis puede llevarse a cabo en el plano 2D de referencia, las soluciones de intersección curva-curva que definen las posiciones de las intersecciones 114 de referencia pueden determinarse de un modo fiable y preciso utilizando cálculos matemáticos elementales.

Además, el delimitador 26 de paso de cinta (ver la FIGURA 1) puede identificar segmentos curvos virtuales 88 marcados (ver la FIGURA 6) en el plano 48 de referencia y no incluir los segmentos curvos virtuales 88 del análisis de intersección curva-curva. Es decir, el delimitador 26 de paso de cinta puede determinar las posiciones de las intersecciones 114 de referencia del límite 110 de cinta de referencia con el límite 112 de capa de referencia utilizando solamente los segmentos curvos ordinarios. En efecto, los segmentos curvos 88 ordinarios son identificados y simplemente ignorados cuando se buscan intersecciones de curvas, o límites, en el plano 48 de referencia.

Además, el delimitador 2 de paso de cinta (ver la FIGURA 1) puede definir patrones 116 de corte de cinta, mostrados en la FIGURA 9, basándose en las posiciones de las intersecciones 114 de referencia y en la definición de la porción del límite 112 de capa de referencia dentro del límite 110 de cinta de referencia. Para identificar puntos dentro del límite 110 de cinta de referencia, o puntos dentro del límite 112 de capa de referencia, el delimitador 26 de pasos de cinta puede llevar a cabo un análisis de contención de puntos. Es decir, el delimitador 26 de pasos de cinta puede determinar si un punto dado en el plano 48 de referencia queda dentro de una curva cerrada dada en el plano 48 de referencia.

En particular, un punto sobre la superficie 46 contorneada quedará dentro del límite 106 de capa sobre la superficie 46 contorneada (ver la FIGURA 7) si, y solo si, el punto correspondiente en el plano 48 de referencia (correlacionado por medio de las funciones  $g_1$  y  $g_2$ ) queda dentro del límite 112 de capa de referencia sobre el plano 48 de referencia. Por tanto, el delimitador 26 de pasos de cinta puede resolver el problema de la contención del punto mediante cálculos en el plano 48 de referencia en lugar de sobre la superficie 46 contorneada.

En general la contención de un punto en una región plana puede determinarse creando un rayo sobre la superficie desde un punto en la superficie hasta el infinito, y determinando el número de intersecciones entre el rayo una curva cerrada de interés. En general, si el número de intersecciones entre el rayo y la curva cerrada es impar, el punto queda dentro de la curva cerrada; si el número de intersecciones es par, el punto queda fuera de la curva cerrada.

Sin embargo, dada la presencia de singularidades en el plano 48 de referencia, el delimitador 26 de pasos de cinta puede llevar a cabo una adaptación nueva de este algoritmo general de contención de punto.

5 El delimitador 26 de pasos de cinta puede lanzar un rayo en el plano 48 de referencia desde un punto en el plano 48 de referencia en una dirección que eventualmente corta un borde "real" del plano 48 de referencia - por ejemplo, un borde del plano de referencia que corresponde a un borde real de la superficie 50 de referencia - si el punto está dentro de una curva de referencia cerrada en el plano 48 de referencia que corresponde a una curva cerrada en la superficie 50 de referencia. Una vez se ha lanzado el rayo en una dirección adecuada, el delimitador 26 de pasos de cinta puede determinar el número de intersecciones entre el rayo y la curva cerrada antes de que alcance el límite de superficie de referencia.

10 Como ejemplo, en el caso de la superficie 50 de referencia cilíndrica de la FIGURA 6, el rayo no puede lanzarse en una dirección vertical del plano 48 de referencia porque esto puede proporcionar un resultado erróneo. Por ejemplo, si se lanzase un rayo hacia arriba desde un punto 124 dentro de una curva 126 de referencia cerrada, el rayo tendría cero intersecciones con la curva 126 de referencia cerrada antes de alcanzar el borde 76 superior, incluso aunque el punto 124 está dentro de la curva 126 de referencia cerrada. Similarmente, si un rayo se lanzase hacia abajo desde el punto 124, el rayo cortaría la curva 126 cerrada dos veces antes de alcanzar el borde 78 inferior, incluso aunque el punto 124 está dentro de la curva 126 cerrada.

15 Del mismo modo, en el caso de la superficie 50 de referencia cilíndrica de la FIGURA 6, si se lanzase un rayo hacia arriba desde un punto 128 fuera pero verticalmente alineado con la curva 126 de referencia cerrada, el rayo tendría una intersección con la curva 126 de referencia cerrada antes de alcanzar el borde 76 superior, incluso aunque el punto 128 está fuera de la curva 126 de referencia cerrada. Similarmente, si se lanzase un rayo hacia abajo desde el punto 128, el rayo cortaría la curva 126 cerrada sólo una vez antes de alcanzar el borde 78 inferior, aunque el punto 124 está dentro de la curva 126 cerrada.

20 Así, por ejemplo, en el caso de una superficie de referencia cilíndrica, el rayo lanzado puede ser una línea recta paralela al eje de la superficie 50 de referencia, o una línea horizontal recta en el plano 48 de referencia, ya que la línea debe eventualmente alcanzar un borde real. Similarmente, en el caso de una superficie de referencia barrida, el rayo lanzado puede ser una línea que corre en paralelo al eje de la superficie 50 de referencia. Sin embargo, en el caso de una forma de la superficie de referencia diferente, el rayo puede lanzarse en cualquier dirección que resulte en que el rayo eventualmente corte un borde real del plano 48 de referencia si el punto de interés está dentro de una curva de referencia cerrada en el plano 48 de referencia que corresponde a una curva cerrada en la superficie 50 de referencia.

25 Además, el delimitador 26 de pasos de cinta puede definir, o delimitar, un paso 118 de cinta de referencia, mostrada en la FIGURA 9, que incluye definiciones de borde de cinta, como los patrones 116 de corte de cinta y las porciones del límite 110 de cinta de referencia entre las intersecciones 114 de referencia vecinas. Además, el delimitador 26 de pasos de cinta puede llevar a cabo un análisis de contención sobre la imagen 108 del plano 48 de referencia para determinar todos los puntos del plano 48 de referencia que corresponden a el paso 118 de cinta de referencia, incluyendo los puntos que comprenden las definiciones de borde de cinta, así como todos los puntos que quedan dentro del área que abarcan las definiciones del borde de cinta.

30 Por tanto, el delimitador 26 de pasos de cinta puede definir convenientemente el paso 118 de cinta de referencia en términos del límite 110 de cinta de referencia con áreas recortadas de acuerdo con los patrones 116 de corte de cinta. Los patrones 116 de corte de cinta pueden representar, por ejemplo, un "corte de extremo" 120 que define un extremo de el paso 118 de cinta, un "corte de muesca" 122 en un lado de el paso 118 de cinta, o un "corte de anchura parcial" (también "corte de anchura-no-total, que no se muestra en las figuras).

35 Además, la determinación de la contención de punto para un conjunto de pasos de cinta dentro de un límite 36, 38 de capa (ver la FIGURA 2) puede ser útil durante la programación de pieza compuesta para facilitar la actualización de una porción de la superficie 46 contorneada dentro del límite 36, 38 de capa para incluir un offset que tenga en cuenta el grosor de la capa de cinta que forma los pasos de cinta. Esto es, todos los puntos dentro del límite 36, 38 de capa pueden desplazarse hacia fuera en una dirección normal a la superficie 46 contorneada. Así, el programa de parte compuesta puede definir una capa subsiguiente, o secuencia de capas, para ser aplicadas sobre una superficie 46 contorneada. Similarmente, la contención de punto se puede utilizar en algoritmos de programas de piezas compuestas adicionales, por ejemplo para reconocer cuando se ha salido de una región de capa al trazar una curva sobre la superficie 46 contorneada.

40 Después de haber definido el paso 118 de cinta de referencia, el transformador 26 de pasos de cinta (ver la FIGURA 1) puede transformar, o correlacionar, el paso de cinta de referencia de nuevo sobre la superficie 46 contorneada. Esta transformación se puede conseguir, por ejemplo, utilizando la función de correlación  $f_0$ , equivalentemente, utilizando las funciones de correlación  $f_1$  y  $f_2$ . Los datos de paso de cinta resultantes pueden utilizarse para generar programas CNC de piezas que se pueden ejecutar en una máquina de aplicación de material compuesto para fabricar una pieza compuesta.

- 5 La FIGURA 10 es un diagrama de flujo que ilustra una secuencia de pasos que se pueden llevar a cabo para generar una definición de paso de cinta. El proceso puede comenzar pasando al paso número 130, "Parametrizar superficie", en el que un generador de pasos de cinta puede recibir una definición de superficie de herramienta de fabricación y múltiples definiciones de capas compuestas asociadas a una definición de pieza compuesta, así como un conjunto de caminos de herramienta independientes de la máquina por la superficie de la herramienta de fabricación. El generador de pasos de cinta puede parametrizar la definición de la superficie de la herramienta de referencia, por ejemplo, siguiendo la secuencia de pasos ilustrada en el diagrama de flujo de la FIGURA 11.
- 10 La FIGURA 11 es un diagrama de flujo que ilustra una secuencia de pasos detallados que pueden llevarse a cabo para parametrizar la superficie de la herramienta de fabricación. En el paso 132, "Seleccionar superficie de referencia", el generador de pasos de cinta puede seleccionar una forma de superficie 3D de referencia relativamente simple que es sustancialmente similar a la forma general de la superficie contorneada de la herramienta de fabricación. Por ejemplo, como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede seleccionar una superficie geométrica relativamente simple. Como ejemplo específico, el generador de pasos de cinta puede seleccionar un cilindro circular para aproximar una herramienta de fabricación para una sección compuesta del fuselaje de un avión.
- 15 El proceso puede entonces continuar hasta el paso 134, "Proyectar rayos normales", cuando el generador de pasos de cinta puede superponer la superficie contorneada, o la superficie de la herramienta de fabricación, sobre la superficie de referencia y lanzar, o proyectar, rayos normales a la superficie de referencia o normales al eje de la superficie de referencia. Por ejemplo, como se ha explicado anteriormente, en el caso donde la superficie de referencia es un cilindro o una superficie barrida con secciones transversales circulares, el generador de pasos de cinta puede proyectar rayos desde el eje del cilindro, o desde el lomo de la superficie barrida, hacia la superficie de referencia.
- 20 Luego, en el paso 136, "Correlacionar superficie con la superficie de referencia", el generador de pasos de cinta puede definir una función de correlación  $f_2$  que correlaciona la superficie de referencia con la superficie contorneada. Por ejemplo, como se ha descrito anteriormente, el generador de pasos de cinta puede identificar los puntos correlacionados donde cada uno de los rayos normales corta la superficie 50 de referencia y la superficie 46 contorneada para deducir la función de correlación  $f_2$ , correlacionar la superficie de referencia con la superficie contorneada basándose en las distancias medidas. Como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede definir entonces una función de correlación  $g_1$  como la inversa de la función de correlación  $f_2$  para correlacionar la superficie contorneada con la superficie de referencia.
- 25 Seguidamente, en el paso 138, "Interpolación huecos", el generador de pasos de cinta puede ajustar la función de correlación  $f_2$  para asegurar que las funciones de correlación resultantes  $g_1$  y  $f_2$  son continuas mediante la interpolación entre las puntas de las superficies parciales en una región donde existe un hueco indeseado entre las superficies parciales que definen la superficie de la herramienta de fabricación. Similarmente, para asegurar que la superficie de referencia tiene una correspondencia uno-a-uno con la superficie contorneada, es decir, que las funciones de correlación  $g_1$  y  $f_2$  están definidas unívocamente sobre las respectivas superficies, en el paso 140, "Desambiguar superposiciones", el generador de pasos de cinta puede ajustar la función de correlación  $f_2$  calculando una media ponderada de múltiples puntos de intersección del rayo lanzado con múltiples superficies parciales en una región donde existen superposiciones inintencionadas de superficies parciales que definen la herramienta de referencia.
- 30 Posteriormente, en el paso 142, "Seleccionar plano de referencia", el generador de pasos de cinta puede desenrollar, desplegar, o aplanar de manera efectiva la superficie de referencia para crear un plano de referencia que corresponda a la superficie de referencia. Por ejemplo, en el caso de la superficie de referencia cilíndrica, como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede seleccionar un plano de referencia rectangular que se pueda enrollar de manera efectiva alrededor de la superficie de referencia cilíndrica.
- 35 El generador de pasos de cinta puede a su vez aplicar una ecuación paramétrica convencional, o conjunto de ecuaciones, para correlacionar el plano de referencia con la superficie de referencia en el paso 144, "Correlacionar superficie de referencia con plano de referencia". Además, como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede definir una función de correlación  $g_2$  como la inversa de la función de correlación  $f_1$  para correlacionar la superficie de referencia con el plano de referencia.
- 40 Como se ha descrito anteriormente, el plano de referencia puede contener regiones con singularidades, como posiciones en las que las funciones de correlación  $f_1$  y  $g_2$  correlacionan dos puntos, líneas o curvas en el plano 48 de referencia con un único punto, línea o curva en la superficie de referencia; o posiciones donde dos puntos a cada lado de una junta de la superficie de referencia cilíndrica pueden estar cerca de bordes opuestos del plano de referencia rectangular. En consecuencia, el generador de pasos de cinta puede posteriormente introducir un "segmento curvo virtual" en el plano de referencia, en el paso 146, "Definir/marcar curvas virtuales", para conectar un punto en el que una curva del plano corta el borde superior del plano con un punto en el que la curva corta el
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65

borde inferior. Como se ha explicado anteriormente, el segmento curvo virtual puede actuar como un marcador de cruce de junta especial.

Una vez la superficie de la herramienta de fabricación ha sido parametrizada en el paso 130, volviendo a la FIGURA 10, el generador de pasos de cinta, el generador de pasos de cinta puede trazar unos límites de cinta tentativos sobre la superficie contorneada basándose en los caminos de herramienta correspondientes en el paso 148, "Trazar límites de cinta". Luego, en el paso 150, "Correlacionar límites", el generador de pasos de cinta puede correlacionar los límites de cinta y un límite de capa (recibido en la definición de capa compuesta) con el plano de referencia utilizando las funciones de correlación  $g_1$  y  $g_2$ .

A continuación, en el paso 152, "Ubicar intersecciones", como se ha descrito anteriormente, el generador de pasos de cinta puede determinar las posiciones de las intersecciones de referencia del límite de cinta de referencia resultante con el límite de capa de referencia resultante. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede ignorar los segmentos curvos virtuales marcados en el análisis de la intersección curva-curva. Posteriormente, en el paso 154, "Definir cortes", el generador de pasos de cinta puede definir patrones de corte de cinta basándose en las posiciones de las intersecciones de referencia, y luego delimitar los pasos de cinta en el paso 156, "Delimitar pasos de cinta", definiendo los bordes de cinta, por ejemplo, en términos del límite de cinta de referencia correspondiente que tiene áreas recortadas de acuerdo con los patrones de corte de cinta. Durante este paso, como se ha explicado anteriormente, el generador de pasos de cinta puede llevar a cabo un análisis de contención de punto para identificar todos los puntos que forman los pasos de cinta.

Adicionalmente, en el paso 158, "Especificar posiciones de cabezal de herramienta", en asociación con las ubicaciones de corte de extremo de cinta, el generador de pasos de cinta puede especificar una serie de requisitos de accionamiento del cabezal de aplicación de material compuesto, como por ejemplo una posición de la subida del cabezal de aplicación de material compuesto en un extremo de paso de cinta en la dirección desde la cual el cabezal de aplicación de material compuesto se aproximará a el paso de cinta, y una posición de descenso del cabezal en un extremo opuesto de el paso de cinta.

Después, en el paso 160, "Transformar pasos de cinta", el generador de pasos de cinta puede transformar, o correlacionar, el paso de cinta de referencia de vuelta sobre la superficie contorneada, por ejemplo utilizando las funciones de correlación  $f_1$  y  $f_2$ . Los datos de paso de cinta resultantes pueden utilizarse para generar programas de piezas CNC que se puedan ejecutar en una máquina de aplicación de material compuesto para fabricar una pieza compuesta.

Las FIGURAS 1, 10 y 11 son diagramas de bloques y diagramas de flujo de métodos, aparatos y productos de programas de ordenador de acuerdo con varias realizaciones de la presente invención. Se debe entender que cada bloque o paso del diagrama de bloques, diagrama de flujo e ilustraciones de control de flujo, y combinaciones de bloques del diagrama de bloques, diagrama de flujo e ilustraciones de control de flujo, pueden ser implementados por medio de instrucciones de programa de ordenador o por otros medios. Aunque se describen instrucciones de programas de ordenador, un aparato de acuerdo con la presente invención puede incluir otros medios, como hardware o alguna combinación de hardware y software, incluyendo uno o más procesadores o controladores, para llevar a cabo las funciones descritas.

A este respecto, la FIGURA 1 muestra el aparato de una realización que incluye varios de los componentes clave de un ordenador convencional mediante el cual se puede implementar una realización de la presente invención. Los expertos en la materia apreciarán que un ordenador puede incluir muchos más componentes que aquellos mostrados en la FIGURA 1. Sin embargo, no es necesario que todos estos componentes generalmente convencionales se muestren para describir una realización ilustrativa para llevar a cabo la invención. El ordenador convencional puede incluir una unidad 12 de procesamiento y una memoria 14 de sistema, que puede incluir una memoria de acceso aleatorio (RAM) y una memoria de sólo lectura (ROM). El ordenador también puede incluir una memoria de almacenamiento no volátil, como por ejemplo un disco duro, donde se pueden almacenar datos adicionales.

Una realización de la presente invención también puede incluir uno o más dispositivos 28 de entrada o salida, como por ejemplo un ratón, un teclado, un monitor, y similares. Se puede proporcionar una pantalla para visualizar datos de texto y gráficos, así como una interfaz de usuario para permitir a un usuario solicitar operaciones específicas. Además, una realización de la presente invención puede ser conectada a uno o más ordenadores a través de una interfaz de red. La conexión puede ser a través de una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), y puede incluir toda la circuitería (circuitos) necesaria para tal conexión. En una realización de la presente invención, la recogida de documentos incluye documentos recibidos por Internet. Otras realizaciones son posibles, incluyendo: una recogida de documentos local, es decir, todos los documentos de un ordenador, documentos almacenados en un servidor o un cliente de un entorno de red, etc.

Típicamente, se pueden cargar instrucciones de programa por ordenador en el ordenador u otra máquina programable de propósito general para producir una máquina especializada, de modo que las instrucciones que se

5 ejecutan en el ordenador u otra máquina programable cree medios para implementar las funciones especificadas en los diagramas de bloque, los diagramas esquemáticos o los diagramas de flujo. Dichas instrucciones de programa de ordenador también puede ser almacenadas en un medio legible por ordenador que cuando se carga en un ordenador u otra máquina programable puede ordenar a la máquina que funcione de un modo particular, de modo que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo fabricado, incluyendo medios de instrucción que implementan la función especificada en los diagramas de bloque, diagramas esquemáticos o diagramas de flujo.

10 Además, las instrucciones de programa de ordenador pueden cargarse en un ordenador u otra máquina programable para provocar que se lleve a cabo una serie de pasos operacionales por parte del ordenador u otra máquina programable para producir un proceso implementado por ordenador, de modo que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otra máquina programable proporcionan pasos para implementar las funciones específicas en el bloque o paso del diagrama de bloques, diagrama esquemático, o diagrama de flujo.

15 En consecuencia, los bloques o pasos del diagrama de bloques, diagrama de flujo o ilustraciones de control de flujo soportan combinaciones de medios para llevar a cabo las funciones especificadas, combinaciones de pasos para llevar a cabo las funciones especificadas, y medios de instrucciones de programa para llevar a cabo las funciones especificadas. También se entenderá que cada bloque o paso de los diagramas de bloques, diagramas esquemáticos o diagramas de flujo, así como combinaciones de bloques o pasos, pueden ser implementados por sistemas de ordenadores basados en hardware de propósito especial, o combinaciones de instrucciones de ordenador y hardware de propósito especial, que llevan a cabo las funciones o pasos especificados.

20 Como ejemplo, que se proporciona sólo a efectos de ilustración, una herramienta de software de entrada de datos de una aplicación de un motor de búsqueda puede ser un medio representativo para recibir una pregunta que incluye uno o más términos de búsqueda. Herramientas de software de aplicaciones similares, o implementaciones de realizaciones de la presente invención, pueden ser medios para llevar a cabo las funciones especificadas. Por ejemplo, una realización de la presente invención puede incluir software de ordenador para realizar la interfaz entre un elemento de procesamiento con un dispositivo de entrada controlado por el usuario, como un ratón, un teclado, una pantalla táctil, un escáner, o similar. Similarmente, una salida de una realización de la presente invención puede incluir, por ejemplo, una combinación de software de visualización, hardware de tarjeta de vídeo, y hardware de visualización. Un elemento de procesamiento puede incluir, por ejemplo, un controlador o microprocesador, como una unidad central de procesamiento (CPU), unidad lógico aritmética (ALU), o unidad de control.

25 Las muchas características y ventajas de la invención son evidentes a partir de la siguiente descripción, y por tanto se pretende que las reivindicaciones adjuntas cubran tales características y ventajas de la invención que están dentro del ámbito real de la invención. Es más, debido a que al experto medio en la materia se le ocurrirán numerosas modificaciones y variaciones, no se desea limitar la invención a la construcción y funcionamiento exactos que se ilustran y describen, y en consecuencia todas las modificaciones y equivalentes adecuados quedan dentro del ámbito de la invención.

40

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un método implementado por ordenador para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de una pieza compuesta, que comprende:
  - aproximar una superficie (46) contorneada real con un plano (48) paramétrico de referencia;
  - correlacionar un límite (106) de capa de la superficie contorneada con un límite (112) de capa de referencia en el plano de referencia;
  - 10 correlacionar un límite de cinta de la superficie contorneada con un límite (110) de cinta de referencia en el plano de referencia; y
  - definir un borde de cinta basándose al menos en parte en una intersección de referencia del límite de capa de referencia y el límite de cinta de referencia, **caracterizado por**:
    - 15 seleccionar una superficie de referencia tridimensional para aproximar la superficie contorneada;
    - definir una primera función (g) para correlacionar un primer punto de la superficie contorneada con un primer punto intermedio de la superficie de referencia;
    - seleccionar el plano de referencia para aproximar la superficie de referencia; y
    - 20 definir una segunda función (f) para correlacionar el primer punto intermedio con un punto de referencia en el plano de referencia.
- 25 2. El método implementado por ordenador de la reivindicación 1, que además comprende definir una función de referencia basándose en la primera función y en la segunda función para correlacionar el primer punto de la superficie de referencia con el punto de referencia en el plano de referencia.
- 30 3. El método implementado por ordenador de la reivindicación 1 o 2, donde la primera función es definida para ser continua sobre la superficie de referencia y la segunda función es definida para ser continua sobre el plano de referencia excepto en uno o más límites del plano de referencia.
- 35 4. El método implementado por ordenador de la reivindicación 3, donde definir la primera función además comprende:
  - interpolarse entre al menos un segundo punto de la superficie contorneada y un tercer punto de la superficie contorneada para definir un punto interpolado; y
  - 40 correlacionar el punto interpolado con un segundo punto intermedio sobre la superficie de referencia utilizando la segunda función, donde la superficie contorneada no se define entre el segundo punto y el tercer punto.
- 45 5. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 2-4, donde el paso de definir la primera función comprende establecer una correspondencia uno-a-uno entre la superficie contorneada y la superficie de referencia.
- 50 6. El método implementado por ordenador de la reivindicación 5, donde el paso de definir la primera función incluye además desambiguar el primer punto, donde la primera función por el contrario correlacionaría al menos un segundo punto sobre la superficie contorneada y un tercer punto sobre la superficie contorneada con el primer punto intermedio.
- 55 7. El método implementado por ordenador de la reivindicación 6, donde desambiguar el primer punto incluye calcular una media ponderada basándose al menos en parte en el segundo punto y en el tercer punto.
- 60 8. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-7, que además comprende:
  - definir una primera función inversa basándose en la primera función para correlacionar el punto de referencia con el primer punto intermedio; y
  - 65 definir una segunda función inversa basándose en la segunda función para correlacionar el primer punto intermedio con el primer punto sobre la superficie contorneada.
9. El método implementado por ordenador de la reivindicación 8, que además comprende definir una función de referencia inversa basándose en la primera función inversa y en la segunda función inversa para correlacionar el punto de referencia del plano de referencia con el primer punto de la superficie contorneada.
10. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-9, donde la superficie de referencia incluye al menos una superficie paramétrica.
11. El método implementado por ordenador de la reivindicación 10, donde la superficie paramétrica comprende al menos una seleccionada de entre las siguientes: un cilindro, una esfera, un hemisferio, un cono, un poliedro, un toro,

una esferoide, una elipsoide, un paraboloide, una hiperboloide, una superficie barrida y una superficie de listel general.

5 12. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-11, que además comprende definir una curva virtual que conecta un primer punto de límite de referencia sobre un primer límite correspondiente del plano de referencia con un segundo punto de límite de referencia sobre un segundo borde correspondiente del plano de referencia, donde los primer y segundo bordes correspondientes se correlacionan ambos con una junta sobre la superficie de referencia y los primer y segundo puntos de límite de referencia se correlacionan ambos con un único punto de límite intermedio sobre la junta.

10 13. El método implementado por ordenador de la reivindicación 12, que además comprende:

marcar la curva virtual para identificar la curva virtual; e  
ignorar la curva virtual cuando se traza un límite de referencia correspondiente.

15 14. El método implementado por ordenador de la reivindicación 12 o 13, que además comprende:

20 marcar la curva virtual para identificar la curva virtual; e  
ignorar la curva virtual cuando se realizan pruebas para la intersección de un límite de referencia correspondiente y una línea en el plano de referencia.

15. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-14, que además comprende determinar una ubicación de la intersección del límite de capa de referencia y el límite de cinta de referencia.

25 16. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-15, que además comprende definir un corte de cinta basándose al menos en parte en el borde de cinta definido.

30 17. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-16, que además comprende definir una ubicación de accionamiento del cabezal de aplicación de material compuesto basándose al menos en parte en el borde de cinta definido.

18. El método implementado por ordenador de cualquiera de las reivindicaciones 1-17, que además comprende:

35 lanzar un rayo en una dirección predeterminada desde un punto de referencia en el plano de referencia, donde la dirección predeterminada asegura que el rayo corta un borde real del plano de referencia que no se correlaciona con una junta de la superficie de referencia;  
cuantificar un número de intersecciones del rayo y una curva cerrada en el plano de referencia; y  
determinar si el punto de referencia está contenido dentro de la curva cerrada basándose en el número de intersecciones.

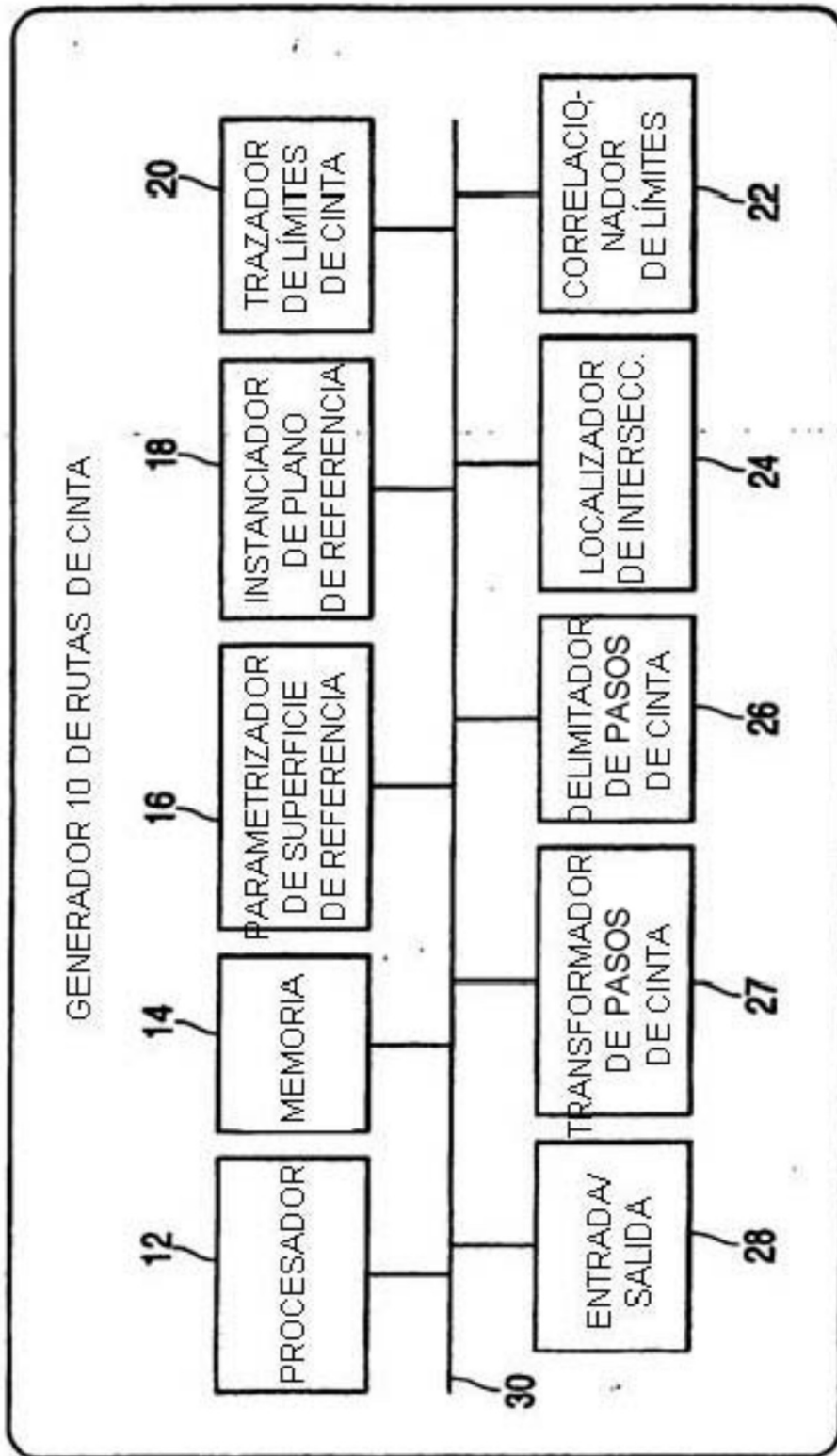
40 19. Un producto de programa de ordenador para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de pieza compuesta, incluyendo un medio legible por ordenador codificado con instrucciones configuradas para ser ejecutadas por un procesador para llevar a cabo operaciones predeterminadas que comprende los pasos del método de cualquiera de las reivindicaciones 1-18.

45 20. El producto de programa de ordenador de la reivindicación 19, donde las operaciones predeterminadas comprenden además cualquiera de los pasos de cualquiera de las reivindicaciones 1-19.

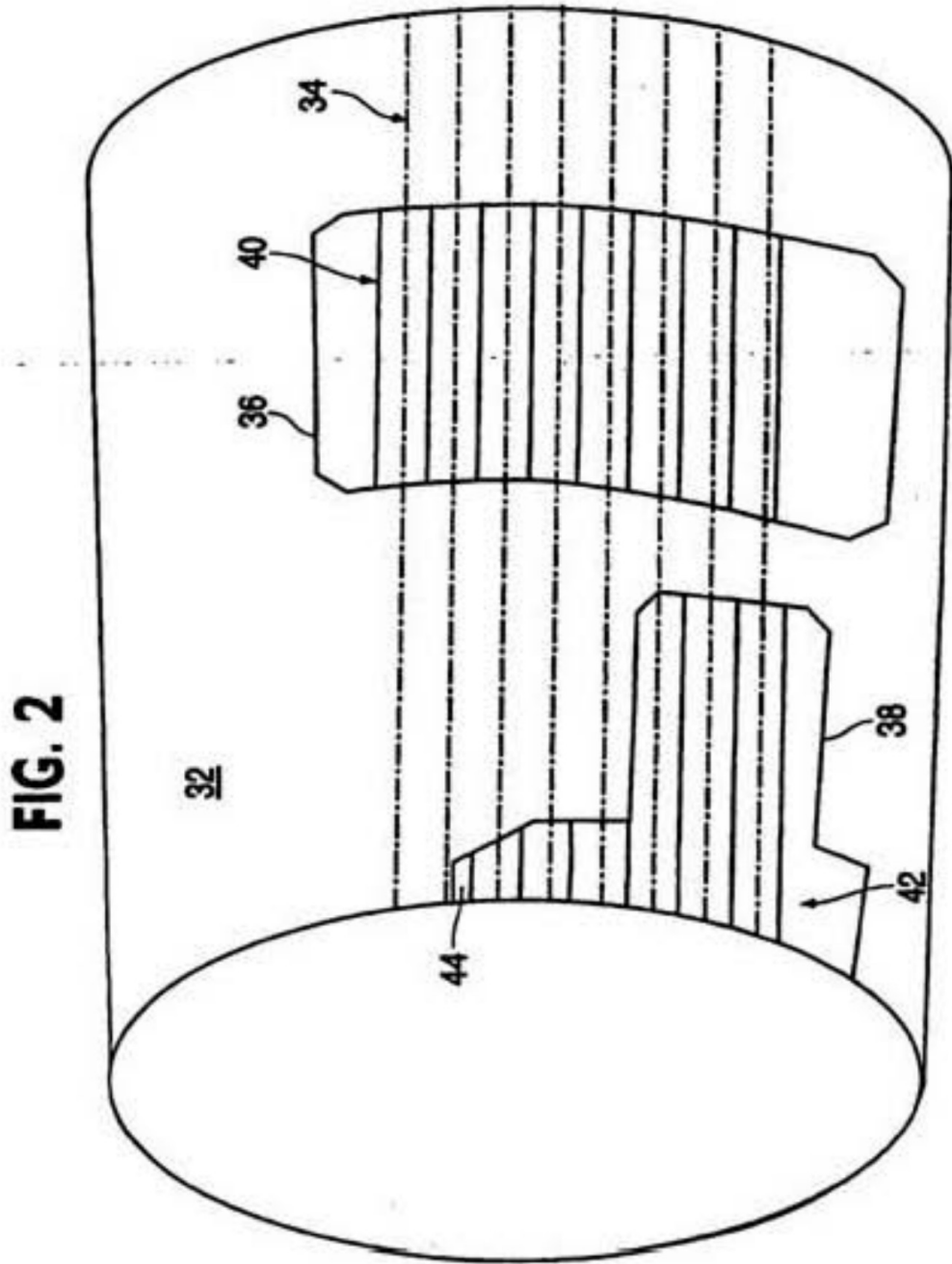
50 21. Un generador de pasos de cinta para definir un paso de cinta compuesta para formar al menos una porción de una capa de pieza compuesta, que comprende:

un parametrizador de superficie de referencia configurado para aproximar una superficie contorneada a una superficie de referencia, correlacionar un límite de capa desde la superficie contorneada con un límite de capa intermedio de la superficie de referencia, y correlacionar un límite de cinta desde la superficie contorneada con un límite de cinta intermedio sobre la superficie de referencia;  
55 un instanciador de plano de referencia configurado para aproximar la superficie de referencia con un plano de referencia, correlacionar el límite de capa intermedia con un límite de capa de referencia en el plano de referencia, y correlacionar el límite de cinta intermedia con un límite de cinta de referencia en el plano de referencia; y  
60 un delimitador de paso de referencia configurado para definir un borde de cinta basándose al menos en parte en una intersección de referencia del límite de capa de referencia y el límite de cinta de referencia, donde el método de cualquiera de las reivindicaciones 1-18 es utilizado para definir el paso de cinta compuesta.

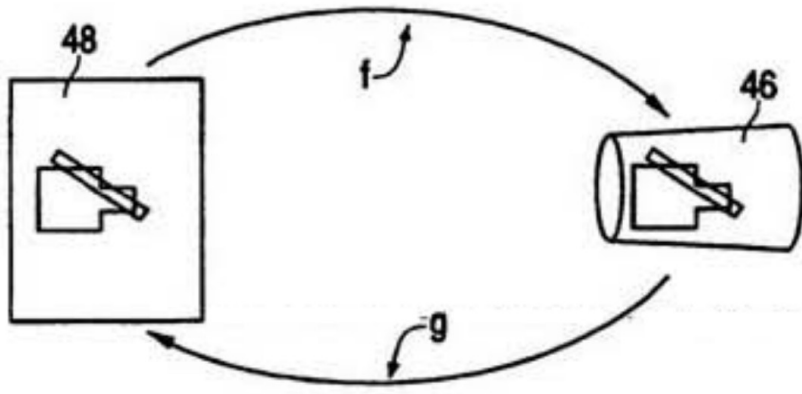
**FIG. 1**



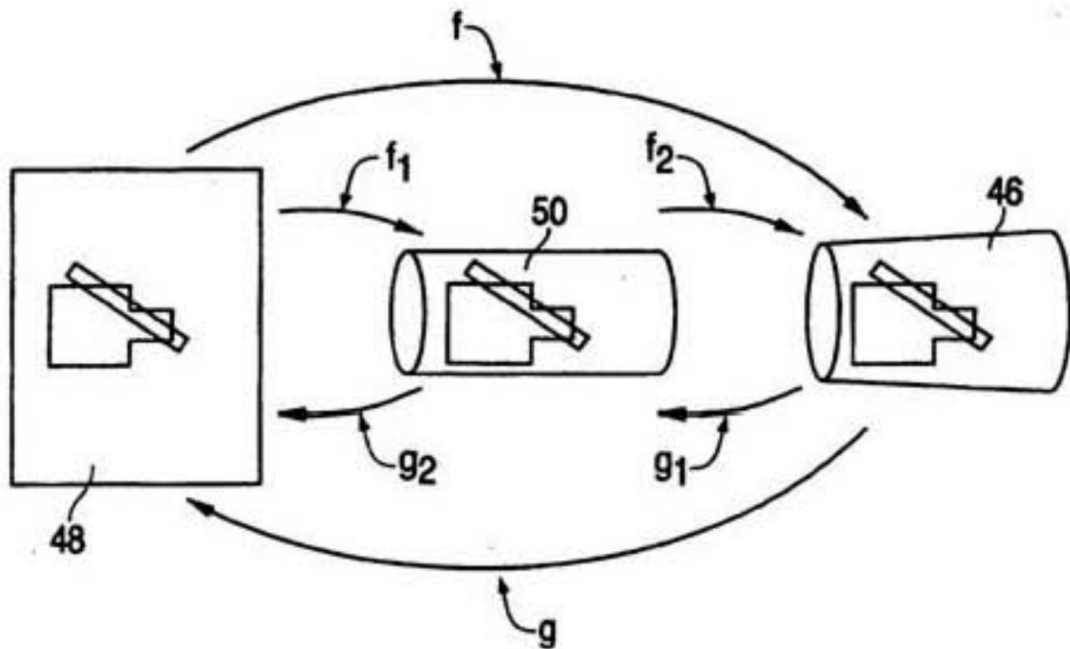




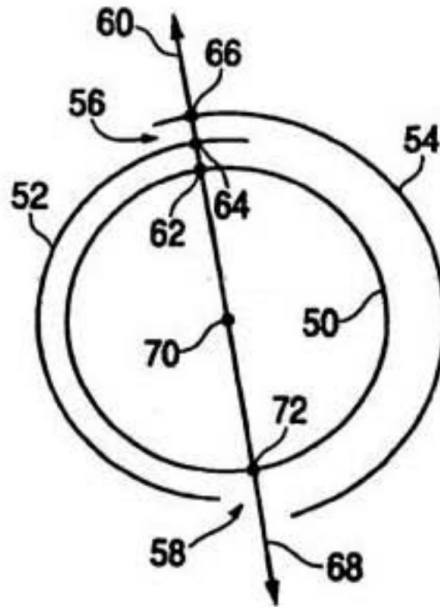
**FIG. 3**



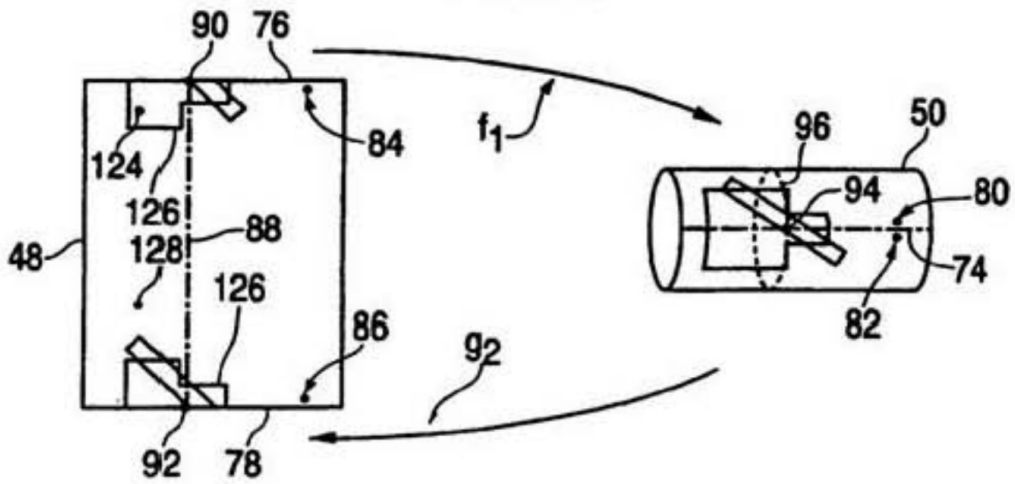
**FIG. 4**



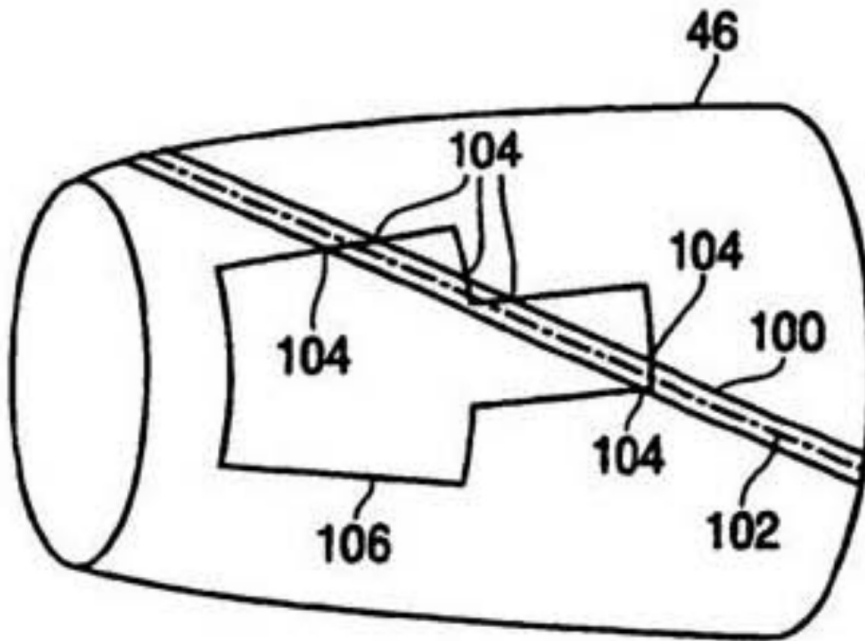
**FIG. 5**



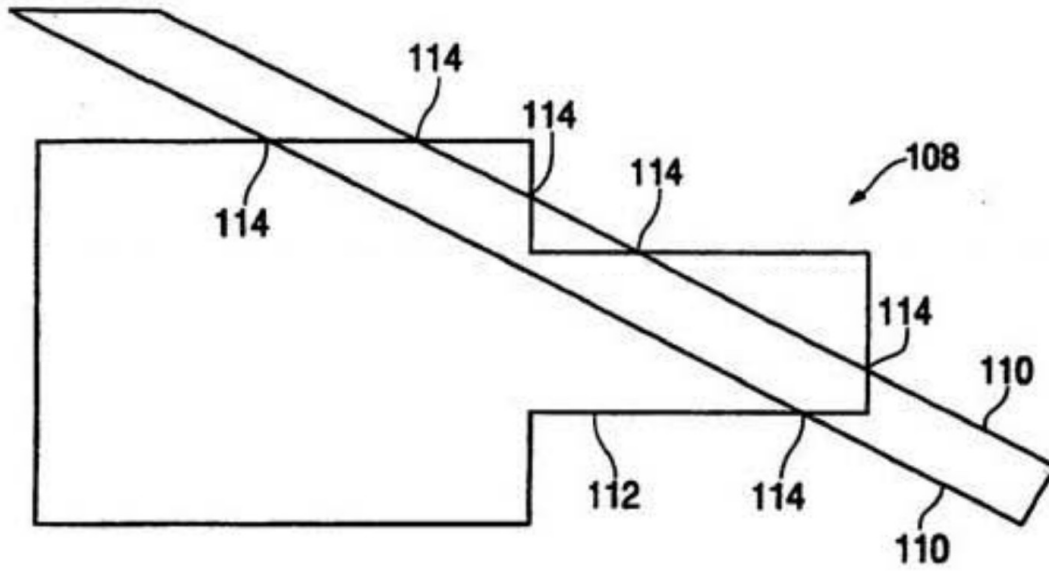
**FIG. 6**



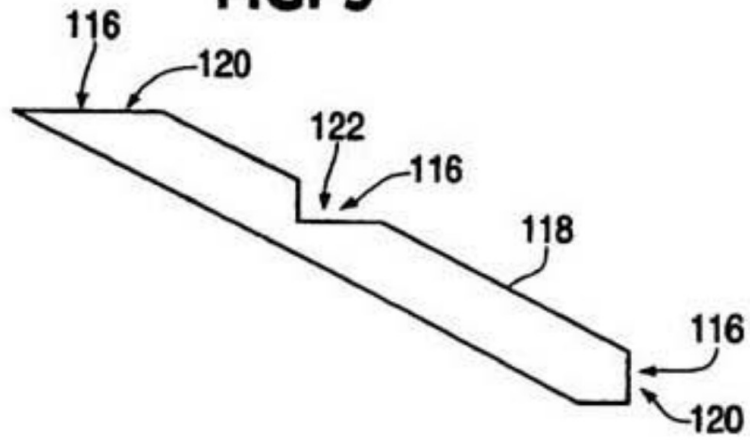
**FIG. 7**



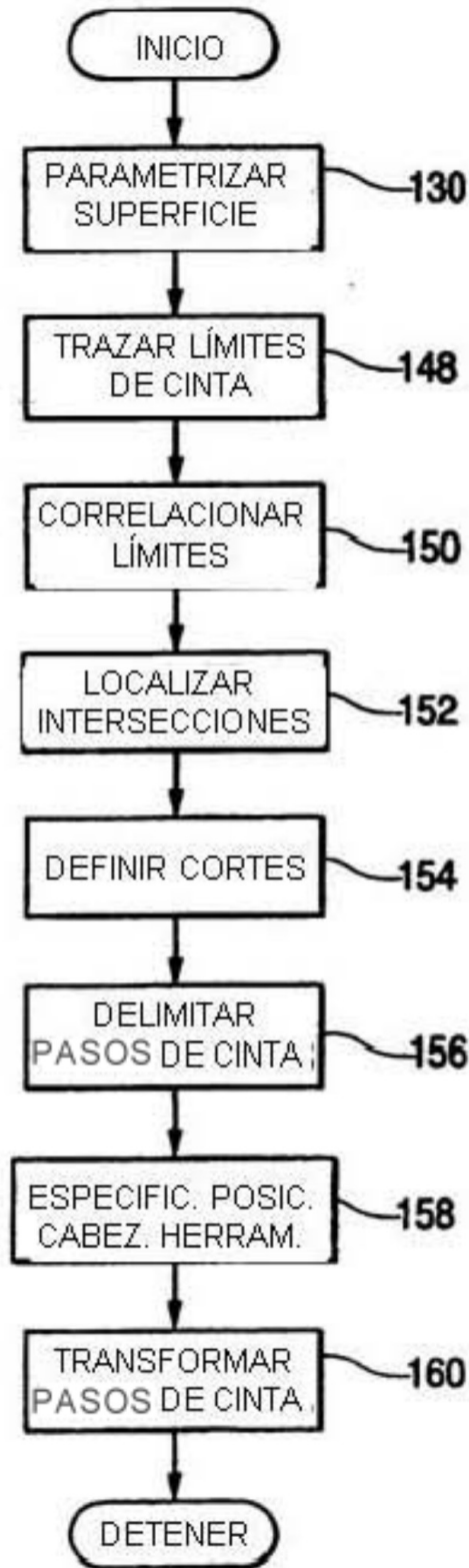
**FIG. 8**



**FIG. 9**



**FIG. 10**



**FIG. 11**

