



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 122022018325-5 B1

(22) Data do Depósito: 24/10/2019

(45) Data de Concessão: 09/05/2023

(54) Título: SISTEMA ÓPTICO PARA MEDIR ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO, GUINADA E ROLAGEM DE UM ELEMENTO

(51) Int.Cl.: G01B 11/26; G01P 3/36; G02B 26/06; G02B 27/09.

(30) Prioridade Unionista: 26/10/2018 US 16/171,883.

(73) Titular(es): NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORPORATION.

(72) Inventor(es): YISA S. RUMALA.

(86) Pedido PCT: PCT US2019057834 de 24/10/2019

(87) Publicação PCT: WO 2020/086828 de 30/04/2020

(85) Data do Início da Fase Nacional: 13/09/2022

(62) Pedido Original do Dividido: BR112021007644-1 - 24/10/2019

(57) Resumo: Um transferidor óptico confocal para medir simultaneamente o ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de guinada de um elemento que inclui uma fonte de laser sintonizável gerando um feixe de laser e um dispositivo SPPR responsivo ao feixe de laser. O transferidor também inclui um divisor de feixe que recebe e divide um feixe de saída do dispositivo SPPR e uma lente sendo responsiva e projetando o feixe dividido no elemento e sendo responsiva a um feixe refletido do elemento. O transferidor inclui ainda um detector de medição responsivo ao feixe refletido do elemento, onde o feixe refletido é convertido em imagem pela lente no detector de medição e um processador recebendo e processando dados de imagem do detector de medição e gerando os ângulos de inclinação, guinada e rolagem dos dados, em que os dados de imagem incluem uma orientação de um padrão de intensidade de vórtice no feixe dividido.

SISTEMA ÓPTICO PARA MEDIR ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO, GUINADA E ROLAGEM DE UM ELEMENTO

DIVIDIDO DO BR112021007644-1, DEPOSITADO EM 24/10/2019

FUNDAMENTOS

CAMPO

[001] A presente descrição se refere geralmente a um transferidor óptico para medir o ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de guinada de um elemento e, mais particularmente, a um transferidor óptico confocal para medir simultaneamente o ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de guinada de um elemento, onde o transferidor emprega um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR) que gera um feixe de padrão de vórtice óptico com picos de intensidade que é refletido de um elemento e para uma câmera ou detector.

DISCUSSÃO

[002] A medição sem contato de ângulos, especificamente ângulos de rolagem, guinada e inclinação, é muitas vezes importante ao fabricar componentes ópticos, construir peças aeroespaciais e aplicações de metrologia de nível de sistema, incluindo alinhamento e rastreamento, impressão 3D, litografia, fabricação de peças de amostra, etc. A maioria das abordagens na técnica que têm sido usadas para medir o ângulo emprega autocolimadores, interferômetros e dispositivos mecânicos com partes móveis. O ângulo de rolagem é o ângulo mais desafiador de medir e, portanto, há um número limitado de sistemas capazes de medir com precisão o ângulo de rolagem.

[003] Os autocolimadores têm sido bem-sucedidos na medição dos ângulos de inclinação e guinada com alta precisão; no entanto, a faixa na qual esses ângulos podem ser medidos é limitada. Adicionalmente, a fim de medir o ângulo de rolagem, um complexo arranjo de autocolimadores é necessário. Os interferômetros podem medir o ângulo de inclinação e o ângulo de

guinada, mas não podem medir o ângulo de rolagem sem um arranjo complexo de elementos ópticos adicionais, por exemplo, óptica de polarização e prismas. Adicionalmente, a operação em ambientes adversos é limitada para muitas ópticas de espaço livre. Dispositivos mecânicos, como transferidores mecânicos, exigiriam que o sistema fosse compacto e seria severamente limitado para medição de ângulo sem contato. Adicionalmente, um sistema com peças móveis teria uma probabilidade muito maior de falha durante a operação por longos períodos de tempo.

[004] Os ângulos de rolagem são normalmente medidos colocando a peça em uma montagem rotativa que inclui marcas angulares embutidas ao longo de sua circunferência e, em seguida, girando a montagem para determinar o ângulo de rolagem da peça. Essa técnica geralmente funciona bem ao construir peças pequenas, mas pode ser desafiadora ao fabricar peças de sistema aeroespacial grandes ou muito pesadas. Outra técnica de medição de ângulo de rolagem conhecida inclui a colocação de um transferidor mecânico na peça para determinar o ângulo de interesse entre dois fiduciais. Para esta técnica, o transferidor mecânico estaria em contato com a superfície para determinar o ângulo de rolagem, o que poderia ser prejudicial para aplicações que requerem uma medição sem contato do ângulo de rolagem. Para medir ângulos cada vez menores em espaços confinados, o raio do transferidor teria que ser maior (tiques mais angulares) ou engrenagens seriam necessárias no transferidor mecânico para amplificar a precisão do ângulo que está sendo medido. Isso poderia facilmente aumentar o tamanho do transferidor mecânico para medições de alta precisão e, portanto, ser problemático ao medir ângulos em espaços confinados. Essa tarefa se torna ainda mais desafiadora ao medir ângulos em superfícies curvas. Além disso, algumas aplicações em impressão 3D, litografia e fabricação de peças em ambientes de sala limpa requerem uma determinação sem contato do ângulo de rolagem, onde o transferidor mecânico estaria em contato com a peça que

está sendo medida. Se a superfície estiver girando a uma taxa constante, o ângulo de rolagem e a taxa de rotação não podem ser deduzidos com um transferidor mecânico.

[005] Os sistemas ópticos podem prover a capacidade de fazer medições sem contato do ângulo entre dois pontos ou linhas estáticas em uma superfície, mesmo quando a superfície é curva e/ou áspera. Em particular, usando uma superposição coerente de vórtices ópticos que tem uma simetria cilíndrica embutida, medições sem contato do ângulo podem ser feitas com uma exatidão e precisão muito altas. Uma propriedade de uma sobreposição coerente de vórtices ópticos é que ela forma uma modulação de intensidade periódica em função do ângulo de rolagem (ângulo azimutal), que pode ser projetada na superfície para a qual o ângulo está sendo medido e detectado com um detector.

[006] Existem vários métodos na técnica para criar uma superposição coerente de vórtices ópticos, incluindo métodos que usam moduladores de luz espacial, placas de fase espiral em um interferômetro, espelhos de fase espiral em um interferômetro, etc. No entanto, esses métodos não permitem controlar o ângulo de rolagem do vórtice óptico sem causar uma rotação mecânica de partes selecionadas do sistema óptico que limita a resolução, ou o sistema óptico consiste em arranjos complexos de elementos ópticos, incluindo estágios motorizados, isto é, para o caso de espelhos espirais, placas q, placas de fase em espiral, etc. Para aqueles métodos que empregam um modulador de luz espacial (SLM), um computador é necessário para controlar o SLM e sua resolução e a geração de deslocamento angular é limitada pela tela SLM sendo pixelada e o intervalo finito da mudança de fase do SLM. Com esses desafios, não há uma maneira clara de miniaturizar o sistema e, ao mesmo tempo, maximizar a precisão da medição do ângulo sem complicar adicionalmente o projeto do sistema óptico.

[007] Um ressonador baseado em uma placa de fase espiral, isto é,

um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR), é um elemento óptico miniaturizado para o qual uma superposição coerente de vórtices ópticos pode ser gerada refletindo a luz do dispositivo ou transmitindo luz através do dispositivo. Houve estudos científicos fundamentais mostrando um efeito ressonador para um dispositivo SPPR de baixa refletividade. Também houve estudos de um sensor de rotação com base no deslocamento Doppler rotacional. No entanto, ainda não há uma demonstração na técnica de um sistema de transferidor óptico completo para aplicações tecnológicas, como fabricação e produção, ou determinação do ângulo de rolagem em relação a um fiducial em sistemas aeroespaciais ou outros.

[008] O Pedido de Patente US Nº de série 15/943.240, intitulado Optical Protractor To Measure Roll Angle On A Static Surface And Rotating Surface, depositado em 2 de abril de 2018, atribuído ao cessionário deste pedido e aqui incorporado por referência, descreve um transferidor óptico que emprega um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR) para medir um ângulo de rolagem entre dois pontos em uma superfície estática ou em uma superfície rotativa. O transferidor inclui uma fonte de *laser* sintonizável que gera um feixe de *laser* e um componente óptico responsivo e converte o feixe de *laser* em um feixe de *laser* de modo único. O dispositivo SPPR recebe o feixe de *laser* de modo único e inclui superfícies reflexivas opostas que refletem o feixe para frente e para trás no dispositivo. Uma das superfícies reflexivas inclui um índice de degrau em espiral que faz com que vários feixes refletidos com diferentes fases sejam combinados como um feixe de saída do dispositivo com um padrão de intensidade de vórtice óptico, onde o padrão de intensidade inclui linhas de intensidade de luz radial. O transferidor inclui uma lente que projeta o feixe emitido no elemento, um detector para detectar a luz refletida do elemento e um processador responsivo aos sinais do detector. O processador gera imagens da luz refletida que incluem o padrão de intensidade de vórtice óptico projetado no elemento e faz

com que a fonte de *laser* mude a frequência do feixe de *laser* de modo que uma das linhas de intensidade se alinhe com um primeiro dos pontos. O processador, então, faz com que a fonte de *laser* mude novamente a frequência do feixe de *laser* para que uma linha de intensidade se alinhe com um segundo dos pontos, onde uma diferença entre as frequências do feixe de *laser* é usada para determinar o ângulo entre os pontos.

SUMÁRIO

[009] A discussão a seguir descreve e descreve um transferidor óptico confocal para medir simultaneamente o ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de guinada de um elemento. O transferidor inclui uma fonte de *laser* sintonizável gerando um feixe de *laser* e um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR) responsivo ao feixe de *laser*. O dispositivo SPPR inclui superfícies reflexivas opostas que refletem o feixe de *laser* para frente e para trás no dispositivo, onde uma das superfícies reflexivas inclui um índice de degrau em espiral que faz com que múltiplas amplitudes de campo refletido tendo diferentes fases sejam combinadas e gerem um padrão de intensidade de vórtice óptico definido pelas fases das amplitudes de campo múltiplas. O padrão de intensidade do dispositivo SPPR inclui uma singularidade no meio do feixe e picos de luz radial em ângulos diferentes em torno do eixo geométrico do feixe. O dispositivo SPPR reflete um primeiro feixe de volta para a fonte de *laser* e transmite um segundo feixe para longe da fonte de *laser*. O transferidor também inclui um primeiro divisor de feixe recebendo e dividindo o primeiro ou o segundo feixe e gerando um feixe de medição dividido e uma lente sendo responsiva e projetando o primeiro feixe de medição dividido no elemento e sendo responsiva a um feixe refletido do elemento. O transferidor inclui ainda um detector de medição responsivo ao feixe refletido do elemento, onde o feixe refletido é convertido em imagem pela lente no detector de medição e um processador recebendo e processando dados de imagem do detector de

medição e gerando os ângulos de inclinação, guinada e rolagem dos dados, em que os dados de imagem incluem uma orientação do padrão de intensidade de vórtice.

[0010] Características adicionais da descrição tornar-se-ão evidentes a partir da seguinte descrição e reivindicações anexas, tomadas em conjunto com os desenhos anexos.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0011] A Figura 1 é um diagrama de blocos esquemático de um transferidor óptico confocal para medir ângulos de rolagem, inclinação e guinada de um elemento, onde um feixe de medição é refletido de um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR) e, então, refletido a partir do elemento;

A Figura 2 é uma vista isométrica do dispositivo SPPR separado do transferidor óptico mostrado na Figura 1;

A Figura 3 é uma vista lateral do dispositivo SPPR mostrando um feixe sendo refletido no mesmo;

A Figura 4 é uma ilustração de uma matriz de detector de pixel único incluindo oito detectores de pixel único dispostos em um círculo;

A Figura 5 é uma imagem de perfil de intensidade de vórtice óptico do feixe refletido do dispositivo SPPR no transferidor mostrado na figura 1;

A Figura 6 é uma imagem de perfil de intensidade de vórtice óptico de um feixe de referência transmitido através do dispositivo SPPR no transferidor mostrado na figura 1;

As Figuras 7 e 8 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na Figura 5 com o feixe refletido acima e abaixo do ponto central, respectivamente, para medir o ângulo de inclinação;

As Figuras 9 e 10 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na Figura 5 com o feixe movido para o lado esquerdo

e o lado direito, respectivamente, para medir o ângulo de guinada;

As Figuras 11 e 12 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na figura 5 com o feixe girado no sentido horário e anti-horário, respectivamente, para medir o ângulo de rolagem;

A Figura 13 é um diagrama de blocos esquemático de um transferidor óptico confocal para medir os ângulos de rolagem, inclinação e guinada de um elemento, onde um feixe de medição é transmitido através de um dispositivo SPPR;

A Figura 14 é uma imagem de perfil de intensidade de vórtice óptico mostrando um feixe transmitido através do dispositivo SPPR no transferidor mostrado na figura 13;

As Figuras 15 e 16 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na Figura 14 com o feixe refletido acima e abaixo do ponto central, respectivamente, para medir o ângulo de inclinação;

As Figuras 17 e 18 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na Figura 14 com o feixe movido para o lado esquerdo e o lado direito, respectivamente, para medir o ângulo de guinada;

As Figuras 19 e 20 são a imagem do perfil de intensidade de vórtice óptico mostrada na figura 14 com o feixe girado no sentido horário e anti-horário, respectivamente, para medir o ângulo do rolagem;

A Figura 21 é um diagrama de fluxo que mostra um processo para encontrar um centroide de feixe para uma imagem de perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de alto contraste;

A Figura 22 é um diagrama de fluxo que mostra um processo para encontrar um centroide de feixe para uma imagem de perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de baixo contraste;

A Figura 23 é um diagrama de fluxo que mostra um processo para determinar o ângulo de inclinação e o ângulo de guinada; e

A Figura 24 é um diagrama de fluxo que mostra um processo

para determinar o ângulo de rolagem.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES

[0012] A seguinte discussão das modalidades da descrição dirigida a um transferidor óptico confocal incluindo um dispositivo SPPR para medir os ângulos de rolagem, inclinação e guinada de um elemento é meramente exemplar por natureza e de forma alguma pretende limitar a descrição ou suas aplicações ou usos.

[0013] Como será discutido em detalhes abaixo, a presente descrição descreve um sistema óptico, ou transferidor óptico, que provê um processo "totalmente óptico" sem partes móveis para medir os ângulos de rolagem, inclinação e guinada de um elemento. O sistema óptico tem aplicação para a fabricação e produção de vários componentes e peças, como para veículos aéreos não tripulados, aviões, porta-aviões, mísseis balísticos, etc., onde uma medição sem contato de ângulos de inclinação, guinada e rolagem de uma peça é importante. O sistema óptico também possui aplicações de visão de máquina, como em robôs e veículos autônomos, para determinar esses ângulos durante o reconhecimento de padrões.

[0014] O elemento principal do sistema óptico é um dispositivo ressonador de placa de fase espiral (SPPR) em que um feixe de luz em uma certa frequência sofre múltiplas viagens de ida e volta refletidas dentro do dispositivo para criar um feixe de saída com um padrão de interferência de modulação de intensidade angular em função de ângulo do feixe. Mudanças precisas do comprimento de onda do feixe que entra no dispositivo SPPR giram os picos de intensidade angular no padrão da saída do feixe do dispositivo SPPR que, quando projetado em uma superfície estática, pode ser detectado para medir os ângulos de inclinação, guinada e rolagem. O padrão de interferência de modulação de intensidade no feixe de saída é o resultado de uma sobreposição coerente de números de enrolamento de vórtice óptico selecionados emergindo do dispositivo SPPR.

[0015] Para garantir a alta precisão dos ângulos medidos mesmo em ambientes adversos, como a presença de vibrações e gradientes de temperatura, é necessário um método de calibração do sistema óptico. O método inclui calibrar o ângulo de rotação do padrão de intensidade de vórtice óptico para o comprimento de onda do feixe e monitorar o deslocamento angular do padrão de intensidade óptica em um detector, como uma câmera CCD, com um feixe de referência. Quaisquer mudanças espúrias no sistema óptico, como mudanças no comprimento de onda do feixe da fonte de *laser*, mudanças no índice de refração da óptica ou vibrações da superfície que está sendo medida, podem ser compensadas durante a medição dos ângulos. As imagens da câmera CCD são lidas em tempo real por meio de algoritmos de processamento de imagens que reduzem os erros na localização do centro dos vórtices ópticos e outras formas de erros sistemáticos na determinação dos ângulos. A frequência do feixe de entrada para o dispositivo SPPR é bloqueada e variada usando técnicas padrão, como esquemas de bloqueio de fase, esquemas de bloqueio de amplitude, etc., e incrementos da frequência girariam o padrão de intensidade para medição, calibração e monitoramento em tempo real.

[0016] A Figura 1 é um diagrama de blocos esquemático de um sistema óptico 10 do tipo discutido acima para medir simultaneamente os ângulos de rolagem, inclinação e guinada entre as linhas fiduciais em uma superfície estática ou rotativa e determinar a taxa de rotação da superfície rotativa. O sistema 10 inclui uma fonte de *laser* de largura de linha estreita 12 que é sintonizável e que emite um feixe de *laser* coerente, por exemplo, na faixa de frequência IR visível, em uma fibra óptica de modo único 14 que provê um feixe de *laser* 18 em, por exemplo, o modo Gaussiano TEM_{00} . Em uma modalidade alternativa, outros elementos ópticos em vez da fibra óptica de modo único 14 podem ser empregados para prover o modo Gaussiano TEM_{00} . Por exemplo, uma abertura projetada apropriadamente (não

mostrada) poderia ser usada para colocar o feixe 18 no modo Gaussiano TEM₀₀ ou limpar o modo óptico. O feixe 18 emitido da fibra 14 é colimado por um colimador 16 posicionado na extremidade da fibra 14 para garantir que o feixe 18 se propague através de todo o sistema óptico 10 com divergência mínima. A luz refletida de volta para a fonte de *laser* 12 pode causar oscilação do feixe na cavidade do *laser*, causando flutuações de intensidade do feixe de *laser* de saída 18 ou mudanças de frequência espúrias no comprimento de onda do *laser*, o que pode causar instabilidade dos modos na cavidade do *laser* e causar a fonte do *laser* 12 para sair do bloqueio. Portanto, um isolador óptico 20 é posicionado após a saída do colimador 16 para evitar a reflexão de volta do feixe de *laser* 18 na fonte de *laser* 12.

[0017] O feixe de modo único 18 que se propaga através do isolador óptico 20 é dividido por um divisor de feixe 22, onde uma pequena porção do feixe 18 é enviada para um detector rápido 24 que monitora a intensidade do feixe e a porção restante do feixe 18 é enviada para um Dispositivo SPPR 26, onde é refletido para frente e para trás no dispositivo 26 como resultado de sua refletividade finita. A Figura 2 é uma vista isométrica e a Figura 3 é uma vista lateral do dispositivo 26 separado do sistema 10. O dispositivo 26 inclui um bloco 28 opticamente transparente, tal como vidro, tendo uma placa reflexiva 30, tal como um revestimento de material reflexivo liso, em um lado de entrada do bloco 28 que é opticamente transmissivo o suficiente para permitir o feixe 18 do colimador 16 para se propagar pelo bloco 28. O dispositivo 26 também inclui um refletor em espiral em degraus 32, como um polímero ou camada de vidro tendo um revestimento de material reflexivo, com um degrau variando azimutalmente 34 tendo altura A_h em um lado de saída do bloco 28 que também é opticamente transmissivo o suficiente para que um feixe de saída pode se propagar através do mesmo e ser emitido a partir do dispositivo 26. Embora revestimentos de material reflexivo lisos sejam empregados neste projeto para prover superfícies reflexivas no bloco

28, em projetos alternativos, estruturas em nanoescala podem ser usadas para prover a refletividade do feixe 18 no bloco 28.

[0018] Se o feixe 18 propagasse através do bloco 28 sem refletividade de superfície, um feixe de vórtice óptico com um número de enrolamento bem definido seria produzido no plano de saída do dispositivo 26, onde o dispositivo 26 atuaria como uma placa de fase espiral. Ao prover refletividade finita em superfícies opostas do dispositivo 26 e prover o refletor 32 tendo a espessura azimutal gradualmente variável, o dispositivo 26 opera como um ressonador de placa de fase espiral (SPPR), onde um feixe de vórtice óptico é emitido do dispositivo 26 como uma sobreposição coerente de vórtices ópticos separados por números de enrolamento positivos específicos. Em outras palavras, cada reflexão do feixe 18 dentro do dispositivo 26 cria um feixe de vórtice óptico individual tendo uma fase única que é emitida a partir do dispositivo 26, mostrado como amplitudes U_i - U_N , cada um tendo um número de enrolamento diferente, isto é, um momento orbital angular, onde o feixe é uma superposição de todas as amplitudes de vórtice óptico U_i - U_N com diferentes números de enrolamento tendo diferentes estados de momento angular orbital e é referido neste documento como um padrão de intensidade de vórtice óptico. O padrão de intensidade de vórtice óptico é, portanto, um padrão de interferência de intensidade periódica baseado na fase dos feixes U_i - U_N que varia em função do ângulo do feixe de vórtice, onde a rotação do padrão de intensidade é controlada pela frequência do feixe 18.

[0019] O padrão de intensidade de vórtice óptico do feixe 18 é emitido do lado de entrada do dispositivo SPPR 26 em direção ao divisor de feixe 22 como um feixe de medição refletido 40 e é enviado do lado de saída do dispositivo SPPR 26 como um feixe de referência transmitido 42 que é usado para fins de calibração. Nesta modalidade não limitativa, o dispositivo SPPR 26 é um dispositivo comercial pronto para uso (COTS) com uma refletividade interna de cerca de 0,04. Esta refletividade faz com que os picos

de intensidade de vórtice no feixe de medição 40 sejam de alto contraste e os picos de intensidade de vórtice no feixe de referência transmitido 42 sejam de baixo contraste. Ao usar o feixe refletido 40 para as medições de ângulo, os picos mais distintos permitem que a luz de fundo seja removida mais facilmente.

[0020] O feixe de referência 42 é convertido em imagem por uma lente 50 posicionada em dois comprimentos focais do dispositivo SPPR 26 em uma câmera de dispositivo de carga acoplada (CCD) 54 através de um atenuador 56 e provê uma referência da orientação do feixe para cálculos de ângulo de rolagem. O feixe de medição 40 é refletido pelo divisor de feixe 22 em direção a um segundo divisor de feixe 60 que direciona uma pequena porção do feixe de medição 40 para um detector 62 que acompanha a orientação do feixe de medição de vórtice óptico 40 e a intensidade do feixe 40 refletido a partir do dispositivo SPPR 26. O detector 62 é mostrado como um detector de múltiplos pixels, como uma câmera CCD, mas pode ser qualquer detector adequado para as finalidades discutidas aqui. Por exemplo, o detector 62 pode ser uma matriz de detector de pixel único 76 incluindo oito detectores de pixel único 78 dispostos em um anel circular, como mostrado na figura 4. O anel circular pode permitir a medição do deslocamento rotacional do feixe 40 com alta precisão.

[0021] A porção principal do feixe de medição 40 é convertida em imagem por uma lente 64, ou uma série de lentes, em uma plataforma 66 através de um obturador 68, onde a lente 64 colima o feixe 40 para obter a imagem da plataforma 66 em uma geometria de imagem confocal. O feixe refletido da plataforma 66 é direcionado pelo divisor de feixe 60 para uma câmera CCD 70 que provê as medições de ângulo, onde a lente 64 faz a imagem do feixe refletido na câmera. Um filtro de banda estreita 72 posicionado na frente da câmera 70 reduz as fontes de luz de fundo em outros comprimentos de onda. Adicionalmente, a lente 64 reduzirá o campo de visão

(FOV) da câmera 70, o que também reduzirá a quantidade de luz retroespalhada que entra na câmera 70. Quando o obturador 68 é fechado, o feixe 40 é refletido na câmera 70 através do divisor de feixe 60. Quando o obturador 68 é aberto, o feixe 40 passa pelo obturador 68 e é retrorrefletido da plataforma 66 para a câmera 70. A câmera CCD 70 também serve para calibrar a posição inicial do feixe 40.

[0022] Um sistema de coordenadas xyz é ilustrado em relação à plataforma 66, onde a rotação em torno do eixo geométrico x indica o ângulo de guinada, a rotação em torno do eixo geométrico y indica o ângulo de inclinação e a rotação em torno do eixo geométrico z indica o ângulo de rolagem. Um perfil de intensidade de vórtice óptico do feixe de medição 40 tendo franjas de alto contraste conforme convertido em imagem na câmera 70 é ilustrado na figura 5, onde o dispositivo 26 é um dispositivo SPPR de baixa refletividade interna, tal como $|r_2|^2=0,04$. Um perfil de intensidade de vórtice óptico do feixe de referência 42 tendo franjas de baixo contraste conforme convertido em imagem na câmera 54 é ilustrado na figura 6. Nessas ilustrações, as áreas sombreadas representam os picos de intensidade do vórtice. O sistema 10 funciona bem quando um dispositivo de maior refletividade interna é implementado nesta modalidade e o dispositivo SPPR 26 pode estar voltado para a frente ou para trás.

[0023] O sistema 10 é calibrado da mesma maneira discutida acima usando a câmera 54 para uma determinação precisa dos ângulos. A partir desta medição, uma função de transferência que define efetivamente a função de calibração do sistema óptico 10 é obtida. A função de transferência converte uma mudança na frequência do *laser* em uma mudança no ângulo, mesmo na presença de efeitos térmicos dos elementos no sistema óptico 10. Idealmente, materiais com um baixo coeficiente de expansão térmica seriam usados no sistema óptico 10 para medições de alta precisão. No entanto, as atualizações da câmera a partir do processo de calibração antes ou durante as

medições permitem a determinação do ângulo em uma superfície estática, mesmo na presença de efeitos térmicos e vibrações. Para medições realizadas após o foco do feixe 42, a fase de Gouy causará um deslocamento adicional na rotação do feixe de referência 42. Este efeito é facilmente levado em consideração durante a calibração do sistema óptico 10.

[0024] O sistema 10 permite que o feixe de vórtice óptico permaneça colimado em longas distâncias para fins de iluminação da plataforma 66. Para determinar o ângulo de rolagem, a frequência do feixe 18 é deslocada para girar o perfil de intensidade angular. Para medir o ângulo de inclinação e o ângulo de guinada, o centroide do feixe 40 é movido de um ponto para outro. Um dispositivo de medição de distância, como LiDAR, RADAR, etc., pode ser usado para estimar a distância ao medir o ângulo de guinada e o ângulo de inclinação.

[0025] Um processador 74 controla o sistema 10 e recebe sinais das câmeras 54 e 70 e do detector 62, e sintoniza a fonte de *laser* 12, para determinar as medições de ângulos de rolagem, guinada e inclinação consistentes com a discussão do presente documento. Como será discutido em mais detalhes abaixo, o feixe 40 é refletido da plataforma 66 quando está em uma posição de referência para determinar a distância entre a plataforma 66 e a câmera 70 e identificar um perfil de feixe inicial. Um deslocamento no perfil do feixe acima ou abaixo do ponto central do perfil do feixe inicial ao longo do eixo geométrico y na orientação descrita é uma medida do ângulo de inclinação como mostrado pelas imagens do perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 7 e 8. Adicionalmente, um deslocamento no perfil do feixe para a esquerda ou direita do ponto central do perfil do feixe inicial ao longo do eixo geométrico x na orientação descrita é uma medida do ângulo de guinada, como mostrado pelas imagens do perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 9 e 10. É notado que a distância para a plataforma 66 e um deslocamento do feixe 40 na câmera 70 são usados para medir os ângulos de

inclinação e guinada. O feixe 40 é girado no sentido horário ou anti-horário em relação a um fiducial (não mostrado) na plataforma 66 para medir o ângulo de rolagem como mostrado pelas imagens de perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 11 e 12.

[0026] No sistema 10, o feixe de medição 40 usado para medir os ângulos de inclinação, guinada e rolagem foi refletido do dispositivo SPPR 26 porque o dispositivo 26 tem uma baixa refletividade interna, como discutido. Em uma modalidade alternativa, o dispositivo SPPR 26 pode ser substituído por um dispositivo de refletividade interna de faixa média, tal como $|r_2|^2 = 0,57$, onde o feixe transmitido através do dispositivo é o feixe de medição. A Figura 13 é um diagrama de blocos esquemático de um sistema óptico 80 deste tipo para medição simultânea dos ângulos de rolagem, inclinação e guinada, onde elementos semelhantes ao sistema 10 são identificados pelo mesmo número de referência. Nesta modalidade, o dispositivo SPPR 26 é substituído por um dispositivo SPPR 82, que é um dispositivo personalizado tendo uma alta refletividade interna, o detector 24 e o divisor de feixe 22 são eliminados e um divisor de feixe 84 é fornecido a jusante do dispositivo SPPR 82, onde o feixe de vórtice do dispositivo 82 é dividido no feixe de referência 42 e no feixe de medição 40.

[0027] O perfil de intensidade óptica do feixe transmitido através do dispositivo SPPR 82 é ilustrado na figura 14. Da mesma maneira como discutido acima para o sistema 10, o feixe 40 é refletido da plataforma 66 quando está em uma posição de referência para determinar a distância entre a plataforma 66 e a câmera 70 e identificar um perfil de feixe inicial. Um deslocamento no perfil do feixe acima ou abaixo do ponto central do perfil do feixe inicial ao longo do eixo geométrico y na orientação descrita é uma medida do ângulo de inclinação como mostrado pelas imagens do perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 15 e 16. Adicionalmente, um deslocamento no perfil do feixe para cima ou para baixo do ponto central do

perfil do feixe inicial ao longo do eixo geométrico x na orientação descrita é uma medida do ângulo de guinada, como mostrado pelas imagens do perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 17 e 18. Novamente, é a distância para a plataforma 66 e um deslocamento do feixe 40 na câmera 70 que devem medir os ângulos de inclinação e guinada. O feixe 40 é girado no sentido horário ou anti-horário em relação a um fiducial (não mostrado) na plataforma 66 para medir o ângulo de rolagem como mostrado pelas imagens de perfil de intensidade de vórtice óptico nas figuras 19 e 20.

[0028] Um dispositivo COTS SPPR com baixa refletividade em suas superfícies ou um dispositivo SPPR fabricado de forma personalizada com alta refletividade em suas superfícies pode ser usado no transferidor óptico confocal (COP) para os sistemas 10 e 80, conforme descrito. Para um dispositivo COTS SPPR, a refletividade nas superfícies do dispositivo é relativamente baixa, isto é, $|r_2|^2 \sim |0,219|^2 = 0,047$. Assim, haverá aproximadamente dois terços menos contagens de fótons fazendo medições rotacionais em comparação com o número máximo de fótons que podem estar fazendo medições de posição rotacional na superfície interna da câmera 70 e na plataforma 66 de interesse. Dependendo do albedo da plataforma 66, pode haver ainda menos partículas de luz convertidas em imagem na câmera 70. Uma das principais vantagens desta geometria confocal do transferidor óptico é a presença de franjas de alto contraste (unidade), independentemente da refletividade do dispositivo SPPR. Isso permite uma melhor relação sinal-ruído, especialmente para um dispositivo COTS SPPR. Quando a refletividade do dispositivo SPPR é aumentada para um valor de $|r_2|^2 = |0,577|^2 = 0,33$, então o número máximo de partículas de luz estará fazendo medições de posição rotacional na geometria de transmissão do dispositivo SPPR para sinal aumentado para relação de ruído na câmera 70.

[0029] As equações que descrevem a amplitude de transmissão através do dispositivo SPPR 26 e a amplitude de reflexão do dispositivo

SPPR 26 podem ser derivadas usando um formalismo de matriz. Para fins de clareza e simplicidade, a transmissão através do dispositivo SPPR 26 ou 82 é representada como:

$$T[\phi] = B + A * T_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta], \quad (1)$$

onde A , B e Φ_0 são usados para estimar a amplitude, estimar o fundo e rastrear a rotação do sinal padrão de intensidade angular com as rotinas de encaixe, $T_1[\Phi, \Phi_0, r_2, \beta]$ é a função de transmissão normalizada que constitui posição angular Φ_0 de um SPPR com um coeficiente de reflexão de Fresnel r_2 , e o número de picos de intensidade variando azimutalmente β . Os parâmetros r_2 e β são parâmetros conhecidos quando o sistema 10 é construído e não mudam durante a operação do sistema. A refletividade do dispositivo SPPR 26 ou 82 é definida como $|r_2|^2$.

[0030] Da mesma forma, a reflexão do dispositivo SPPR 26 é representada como:

$$R[\phi] = B + A * R_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta], \quad (2)$$

onde $R_1[\Phi, \Phi_0, r_2, \beta]$ é uma função de reflexão normalizada.

[0031] O ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de guinada são medidos mantendo o controle das propriedades específicas do feixe de vórtice óptico retrorrefletido da superfície externa para a câmera 70. Essas propriedades incluem o centroide dos picos de intensidade individuais, o centroide de todo o feixe de vórtice óptico e o deslocamento rotacional do perfil de intensidade de vórtice óptico. Haverá quatro picos de intensidade projetados na superfície da plataforma 66 para os quais os ângulos devem ser medidos. Os algoritmos para medir os ângulos de rolagem, inclinação e guinada permitirão que a posição dos picos de intensidade individuais e o centro do vórtice óptico sejam conhecidos com um alto grau de exatidão e precisão. Devido aos quatro picos de intensidade separados, a precisão da medição é melhorada por um fator de quatro na medida do ângulo de rolagem, ângulo de inclinação e ângulo de rolagem, em comparação com se um pico de

intensidade estreito fosse usado para determinar o ângulo. Embora este projeto use quatro picos de intensidade, pode haver significativamente mais picos de intensidade ou menos picos de intensidade emergindo do dispositivo SPPR 26.

[0032] O ângulo de rolagem é determinado acompanhando a rotação dos vórtices ópticos, isto é, o deslocamento rotacional (deslocamento angular) do feixe do vórtice óptico na câmera 70. A resolução na determinação do ângulo de rolagem é bastante alta, mantendo uma grande faixa sobre a qual o ângulo de rolagem é medido. Este ângulo pode ser estendido ao longo da faixa de medição de 360°. O ângulo de inclinação é determinado mantendo o controle do deslocamento vertical do centroide do feixe de vórtice óptico da plataforma externa na câmera 70. Da mesma forma, o ângulo de guinada é determinado acompanhando o deslocamento horizontal do feixe de vórtice óptico retrorrefletido da plataforma externa. O ângulo de guinada e o ângulo de inclinação são calculados a partir da distância até o alvo e do deslocamento do feixe na câmera 70. Antes do feixe de vórtice óptico ser retrorrefletido da plataforma 66, ele é retrorrefletido internamente para fora do obturador 68 quando o obturador 68 é fechado para determinar a posição inicial do feixe de vórtice óptico 40. Isso inclui a posição inicial do centroide do feixe e a posição inicial dos picos de intensidade angular. Este processo ocorre em sequência com os outros processos de calibração do sistema, incluindo intensidade do *laser* usando o detector 24 e calibração de frequência do *laser* usando a câmera 54, bem como monitorando a rotação interna do feixe de vórtice óptico 48 nas câmeras 54 e 70 e no detector 62. Em uma modalidade diferente, a posição inicial pode ser determinada em uma superfície plana externa de ângulo conhecido para a calibração do ângulo inicial. Além disso, há uma função de transferência armazenada que converte o comprimento de onda do *laser* em rotação do feixe de vórtice óptico.

[0033] O deslocamento angular para medir o ângulo de rolagem e os

deslocamentos para estimar o ângulo de guinada e o ângulo de inclinação são estimados a partir de rotinas de encaixe não lineares. O ângulo de guinada e o ângulo de inclinação são determinados a partir de um deslocamento vertical e horizontal no centroide dos quatro picos de intensidade, nos eixos geométricos x e y da câmera 70, respectivamente, bem como a distância ao alvo. O ângulo de rolagem é determinado pelo deslocamento rotacional dos picos de intensidade. Como há quatro picos de intensidade individuais projetados na câmera 70 com contraste unitário, esses picos de intensidade são ajustados individualmente. A partir da posição dos picos de intensidade, obtém-se o centroide de todo o feixe. Os centroides são primeiro calculados a partir dos dados usando a fórmula apropriada e, em seguida, esses valores são usados como valores iniciais na rotina de encaixe não linear para rastrear a posição de interesse. A determinação precisa do centroide do feixe é o primeiro passo para determinar o deslocamento angular do feixe retrorrefletido. No caso de haver manchas nas imagens, múltiplas imagens podem ser analisadas em conjunto para reduzir os efeitos de manchas.

[0034] A determinação dos ângulos de rolagem, inclinação e guinada requer conhecimento do centro absoluto do feixe 40. Para um feixe de vórtice óptico com uma singularidade, isto é, um núcleo de vórtice óptico muito pequeno (ou nenhum núcleo) gerado pelo dispositivo SPPR 26, o centro do feixe 40 é definido como o ponto onde todos os picos de intensidade se encontram, que é equivalente ao centroide do feixe. Um algoritmo para calcular o centro do feixe 40 é discutido abaixo. O algoritmo funciona bem para um número par de picos de intensidade de vórtice óptico, isto é, quando p é um número par, portanto, para este propósito, assume-se que $p = 4$. No entanto, o algoritmo pode ser adaptado para funcionar bem para um número ímpar de picos de intensidade. O algoritmo é discutido para dois casos, a saber, um primeiro caso para um perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de alto contraste do feixe 40 convertido em imagem na câmera 70 e

um segundo caso para um perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de baixo contraste do feixe 40 convertido em imagem na câmera 70. Mais particularmente, dependendo da escolha do dispositivo SPPR 26 ou 82, a câmera 70 pode receber franjas de alto ou baixo contraste. Quando o dispositivo SPPR tem baixa refletividade, a câmera 70 produz imagens com franjas de baixo contraste, mas com um dispositivo SPPR de média a alta refletividade, isto é, um dispositivo SPPR personalizado, a câmera 70 produz imagens com franjas de alto contraste. A câmera 70 sempre terá franjas de contraste relativamente alto para os sistemas 10 e 80.

[0035] A Figura 21 é um diagrama de fluxo 90 que mostra um processo para determinar o centro do perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de alto contraste do feixe 40 convertido em imagem na câmera 70. O obturador 68 é fechado na caixa 92 de modo que não haja luz das superfícies externas, embora possa não ser necessário em alguns projetos fechar o obturador 68. Quando o obturador 68 é fechado, o feixe 40 é retrorrefletido do obturador 68 para a câmera 70 na caixa 94. A tela de pixel na câmera 70 é segmentada em uma série de quadrantes representativos do número de picos de intensidade no feixe 40 na caixa 96. Neste exemplo, existem quatro picos de intensidade, isto é, $f_t = 4$ e, portanto, quatro quadrantes, onde cada quadrante é integrado no eixo geométrico x e no eixo geométrico y na caixa 98. O centroide e a largura do pico de intensidade em cada quadrante são estimados usando os dados coletados na caixa 100, e esses valores são armazenados individualmente para todos os quatro quadrantes. Uma rotina de encaixe não linear é aplicada ao pico de intensidade em cada quadrante na caixa 102, onde os valores iniciais na rotina de encaixe são estimados na caixa 100 e onde uma função tipo Gaussiana é empregada como o modelo na rotina de encaixe em uma modalidade não limitativa. A posição do centroide x e y e a largura de cada pico de intensidade são estimadas usando a rotina de encaixe na caixa 106. A partir dos valores da posição

centroide de cada pico de intensidade, a posição central do feixe 40 é calculada para a precisão de subpixel e os valores são armazenados na caixa 108. Uma forma de computar a posição central do feixe 40 é tirar a média dos respectivos picos de intensidade x e y nos quadrantes diagonais. Os valores do centroide e da largura dos picos de intensidade individuais em cada quadrante, e o centroide de todo o feixe forma a posição inicial na determinação do ângulo quando o obturador 68 está fechado ou aberto.

[0036] O contraste de franja baixo é para o caso de transmissão óptica através de um SPPR quando a refletividade do dispositivo SPPR 26 é baixa. Este seria o caso para o hardware óptico no sistema 10, onde a imagem / quadro é tipicamente monitorado na câmera 54 durante a calibração dinâmica. Encontrar o centro do feixe de vórtice óptico 40 é geralmente feito quando o sistema 10 é inicialmente construído. O ponto central é então monitorado usando este procedimento para garantir que não haja nenhum desvio estatisticamente significativo na posição central durante a operação do sistema.

[0037] A Figura 22 é um diagrama de fluxo 112 que mostra um processo para determinar o centro do perfil de intensidade de vórtice óptico com franjas de baixo contraste do feixe 42 convertido em imagem na câmera 54. O feixe 42 é transmitido através do dispositivo SPPR 26 na caixa 114 e as contagens integradas no eixo geométrico x e y são calculadas na caixa 116. O centroide e a largura do feixe 42 são estimados na caixa 118 usando os dados coletados, e esses valores são armazenados. Uma rotina de encaixe não linear é aplicada ao feixe 42 na caixa 102, onde os valores iniciais na rotina de encaixe são estimados na caixa 118, e onde uma função tipo Gaussiana é empregada como o modelo na rotina de encaixe para o todo feixe 42 em uma modalidade não limitativa. A posição do centroide x e y e a largura do feixe 42 são obtidas a partir da rotina de encaixe não linear na caixa 124. As operações nas caixas 116 a 124 são repetidas em diferentes ângulos de

rotação, variando a frequência do *laser* do feixe 42 para garantir a consistência da posição do centro do feixe (centroide) na caixa 126. No caso em que um dispositivo SPPR de baixa refletividade é usado, este valor é comparado ao valor previamente armazenado da posição central do feixe 42 na caixa 128. Não deve haver muito desvio dos valores armazenados durante a calibração inicial. Em outras palavras, o desvio não deve ser maior do que valores de subpixel.

[0038] A Figura 23 é um diagrama de fluxo 130 que mostra um processo para calcular os ângulos de inclinação e guinada da plataforma 66. O obturador 68 é fechado na caixa 132 de modo que não haja luz da superfície externa para a câmera 70. O feixe 40 é retrorrefletido do obturador 68 (ou superfície de calibração externa) e para a câmera 70 na caixa 134. O centroide do feixe 40 é calculado como discutido acima nos diagramas de fluxograma 90 ou 112 na caixa 136. O obturador 68 é aberto na caixa 138 e o centroide do feixe retrorrefletido é calculado na caixa 140. O ângulo de inclinação é determinado a partir do deslocamento vertical do feixe 40 na câmera 70 na caixa 142, onde cada valor de deslocamento vertical corresponde a uma medida do ângulo de inclinação. O ângulo de guinada é determinado a partir do deslocamento horizontal na câmera 70 na caixa 144, onde cada valor do deslocamento horizontal corresponde a um ângulo de guinada. Se o ângulo de inclinação e o ângulo de guinada estão mudando continuamente, então, medições contínuas podem ser realizadas para estimar o ângulo de mudança como uma função da posição na tela da câmera 70 na caixa 146. Os ângulos de inclinação e guinada são armazenados na caixa 148.

[0039] A Figura 24 é um fluxograma 150 que mostra um processo para calcular o ângulo de rolagem da plataforma 66. O obturador 68 é fechado na caixa 152 de modo que nenhuma luz incida na plataforma 66. A intensidade da fonte de *laser* 12 é estabilizada usando os detectores 24 e 62 e a câmera 54 na caixa 154, e a frequência inicial da fonte de *laser* 12 é

determinada pela posição angular do pico de intensidade nas câmeras 54 e 70 na caixa 156. As câmeras 54 e 70 são sincronizadas na caixa 158 para garantir que recebam os quadros de imagem simultaneamente. O centroide do feixe 40 nas câmeras 54 e 70 são estimados conforme descrito no diagrama de fluxo 90 ou 112 na caixa 160. A presença de fundo é subtraída dos valores obtidos pela rotina de encaixe não linear. O centroide do feixe 40 que é retrorrefletido do obturador 68 para a câmera 70 é estimado na caixa 162. As contagens integradas ao longo da direção radial a partir da posição do centroide do feixe são computadas como uma função do ângulo de rolagem na câmera 54 na caixa 164 e as posições dos picos de intensidade angular usando uma rotina de encaixe não linear são estimadas na caixa 166, onde esses valores são armazenados. As contagens integradas ao longo da direção radial a partir da posição do centroide do feixe são computadas como uma função do ângulo de rolagem na câmera 70 na caixa 168 e as posições dos picos de intensidade angular usando uma rotina de encaixe não linear são estimadas na caixa 170, onde esses valores são armazenados.

[0040] O obturador 68 é aberto na caixa 172 e o feixe 40 é projetado na plataforma 66 e é convertido em imagem na câmera 70 na caixa 174. O centroide do feixe 40 convertido em imagem na plataforma 66 é determinado usando o diagrama de fluxo 90 ou 112 na caixa 176. As contagens radialmente integradas a partir do centroide do feixe 40 são calculadas como uma função do ângulo de rolagem na caixa 178. A posição dos picos de intensidade é obtida a partir da rotina de encaixe de otimização não linear na caixa 180. O posicionamento inicial dos picos de intensidade para a rotina de encaixe não linear é armazenado a partir do processo de calibração, onde o feixe 40 é retrorrefletido do obturador 68, na caixa 182. Quando a plataforma 66 é rotacionada, o feixe de vórtice óptico rastreia a rotação por meio de uma mudança na frequência do feixe de *laser*, que rotaciona a orientação do perfil de intensidade de vórtice óptico. O ângulo de rolagem é estimado na caixa

184. Se a plataforma 66 for rotacionada em etapas incrementais, então o padrão de vórtice óptico do feixe 40 pode ser rotacionado em etapas incrementais para determinar o ângulo de rolagem. Se houver rotação contínua suave da plataforma 66 a uma taxa rápida, então o ângulo de rolagem pode ser obtido usando o deslocamento Doppler rotacional.

[0041] A discussão precedente descreve e descreve modalidades meramente exemplificativas da presente descrição. Um versado na técnica reconhecerá prontamente a partir de tal discussão e dos desenhos e reivindicações anexos, que várias mudanças, modificações e variações podem ser feitas nos mesmos, sem se afastar do espírito e escopo da descrição conforme definido nas seguintes reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema óptico (10) para medir ângulos de inclinação, guinada e rolagem de um elemento (66), sendo que o dito sistema (10) compreende:

uma fonte de *laser* sintonizável (12) gerando um feixe de *laser* (18);

um dispositivo (26) ressonador de placa de fase espiral (SPPR) responsivo ao feixe de *laser* (18), sendo que o dito dispositivo SPPR (26) inclui superfícies reflexivas (30, 32) opostas que refletem o feixe de *laser* para frente e para trás no dispositivo, em que uma das superfícies reflexivas (32) inclui um índice de degrau em espiral que causa múltiplas amplitudes refletidas tendo diferentes fases a serem combinadas e gerar um padrão de intensidade de vórtice óptico definido pelas fases das amplitudes múltiplas, onde o padrão de intensidade inclui uma singularidade e picos de luz radial, sendo que o dito dispositivo SPPR (26) reflete um primeiro feixe de volta para a fonte de *laser* (12) e transmite um segundo feixe para longe da fonte de *laser* (12);

um primeiro divisor de feixe (22) recebendo e dividindo o primeiro feixe e gerando um feixe de medição dividido (40);

uma lente (64) sendo responsiva e projetando o primeiro feixe de medição dividido no elemento (66) e sendo responsiva a um feixe refletido do elemento (66);

um detector de medição (70) responsivo ao feixe refletido do elemento (66), onde o feixe refletido é convertido em imagem pela lente (64) no detector de medição (70); e

um processador (74) recebendo e processando dados de imagem do detector de medição (70) e a orientação de referência do padrão de intensidade de vórtice e gerando os ângulos de inclinação, guinada e rolagem a partir dos dados, em que os dados de imagem incluem uma orientação do padrão de intensidade de vórtice, e

o sistema óptico (10) caracterizado pelo fato de que

compreende ainda:

um detector de calibração (54) responsivo ao segundo feixe e gera uma orientação de referência do padrão de intensidade de vórtice;

em que o ângulo de inclinação é determinado por um deslocamento do padrão de intensidade de vórtice em um plano, o ângulo de guinada sendo determinado por um deslocamento do padrão de intensidade de vórtice em outro plano ortogonal ao plano anterior, e o ângulo de rolagem sendo determinado por uma rotação do padrão de intensidade do vórtice.

2. Sistema óptico (10) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o padrão de intensidade de vórtice inclui um pico de intensidade em cada um dos quatro quadrantes.

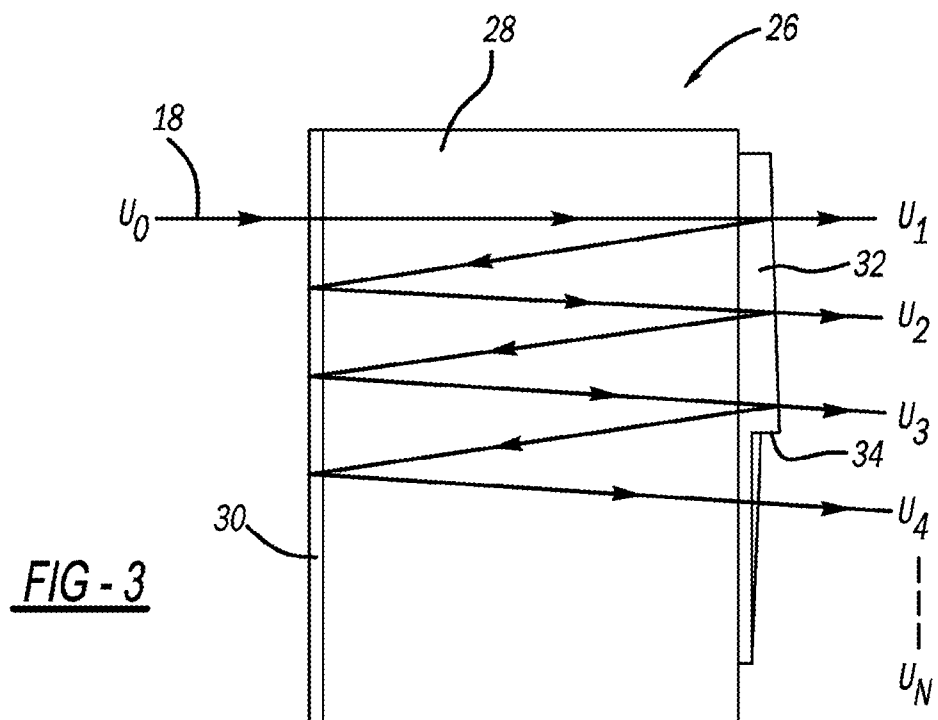
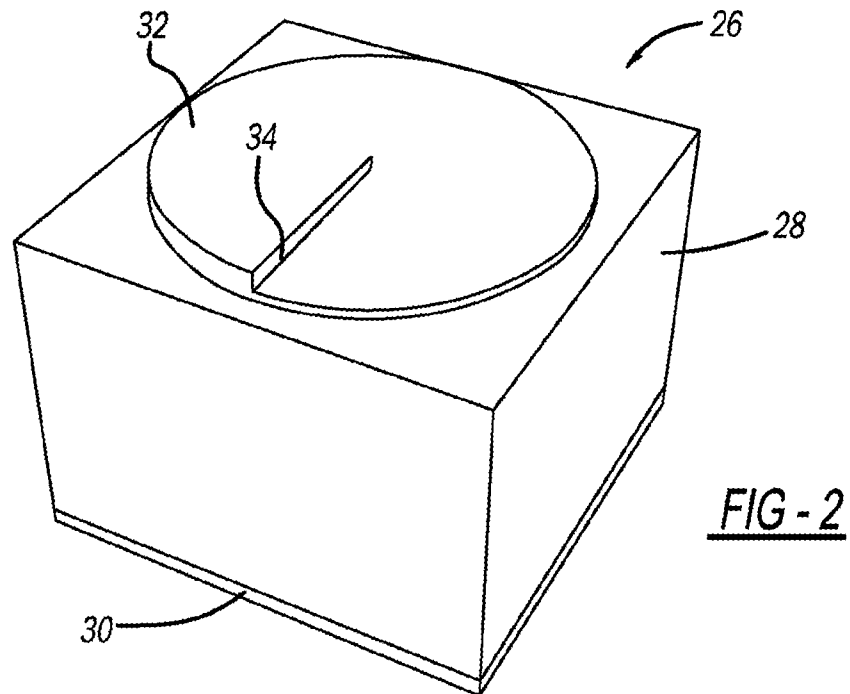
3. Sistema óptico (10) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um segundo divisor de feixe (60) recebendo e direcionando o feixe de medição dividido para a lente (64), em que o segundo divisor de feixe (60) recebe e direciona o feixe refletido para o detector de medição (70).

4. Sistema óptico de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um obturador (68) através do qual o feixe de medição dividido se propaga da lente (64) para o elemento (66).

5. Sistema óptico (10) de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um detector (62) que é responsivo a um feixe refletido dividido do segundo divisor de feixe (60) quando o obturador (68) está fechado, sendo que o dito detector (62) provê calibração do feixe.

6. Sistema óptico (10) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um detector de intensidade (24) responsivo a um feixe dividido do primeiro divisor de feixe (22), sendo que o dito detector de intensidade (24) monitora a intensidade do feixe.





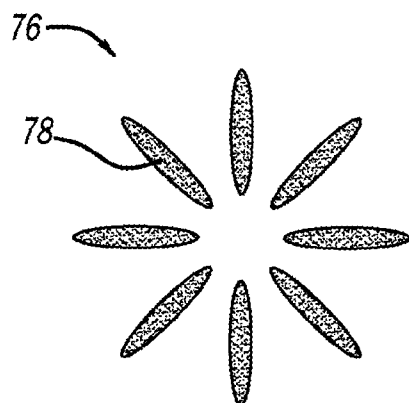


FIG - 4

FIG - 5

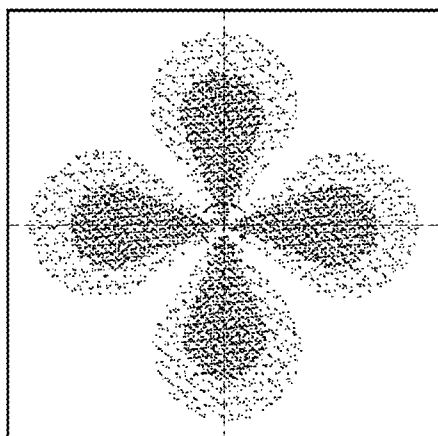
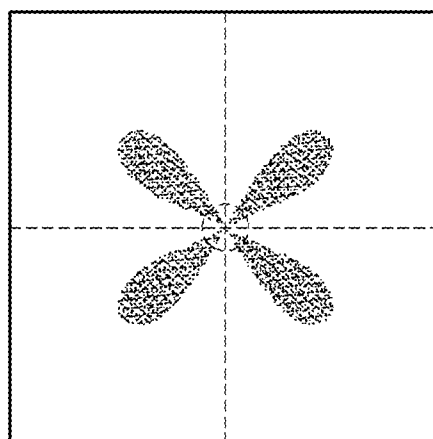


FIG - 6

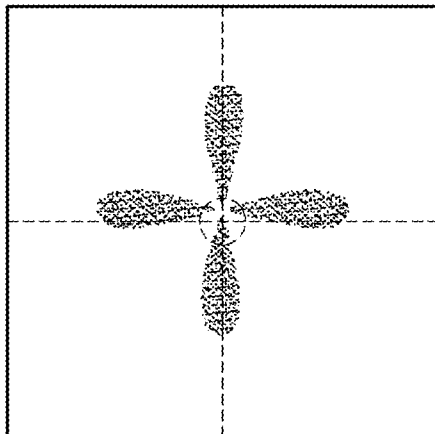


FIG - 7

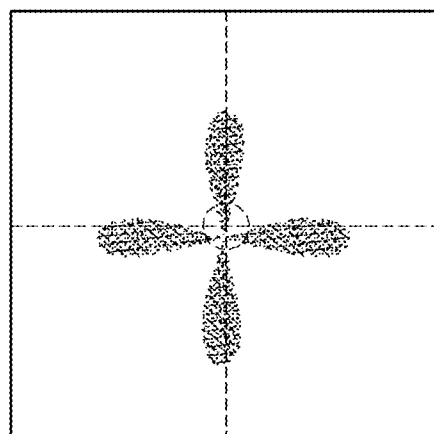


FIG - 8

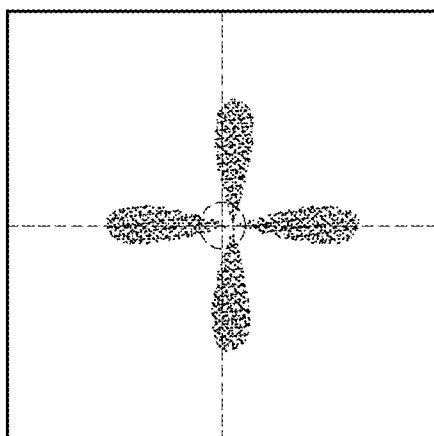


FIG - 9

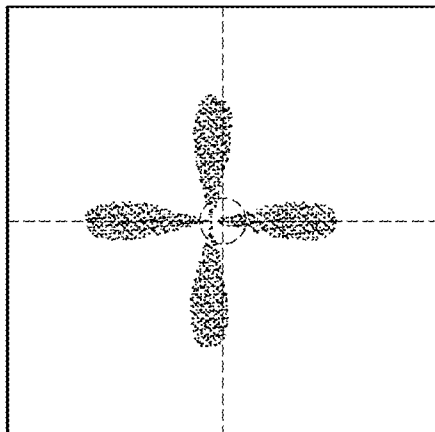


FIG - 10

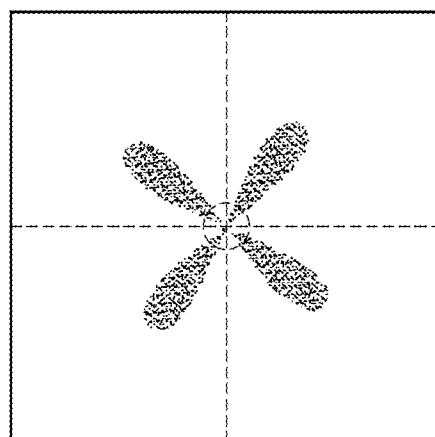


FIG - 11

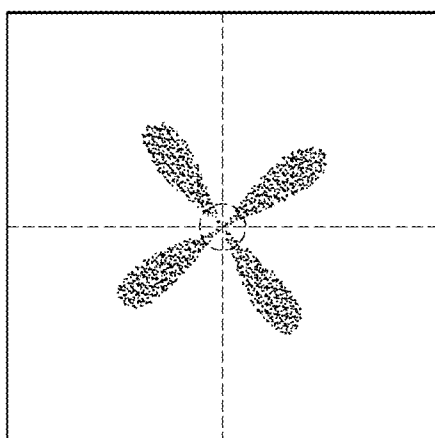


FIG - 12

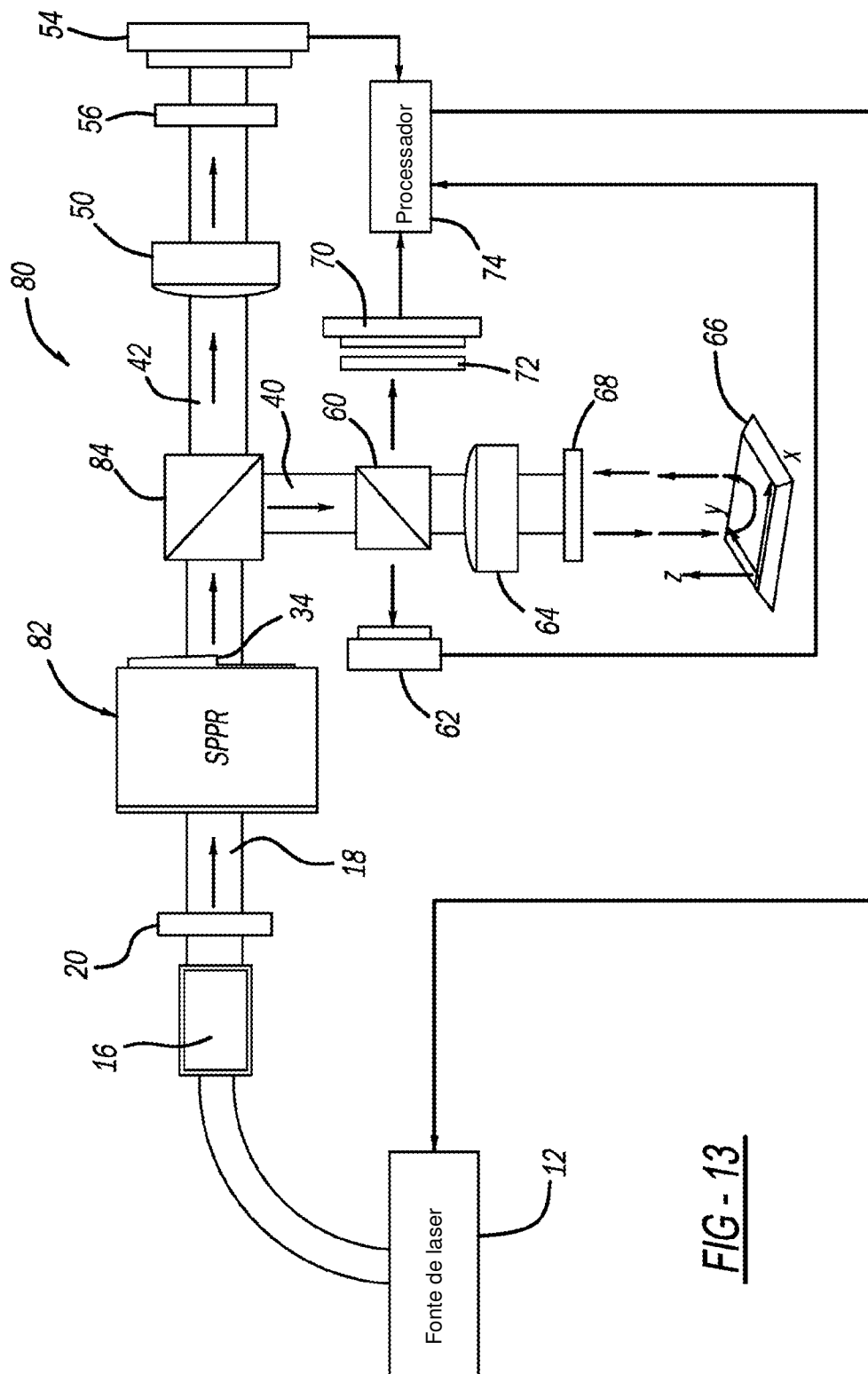


FIG - 13

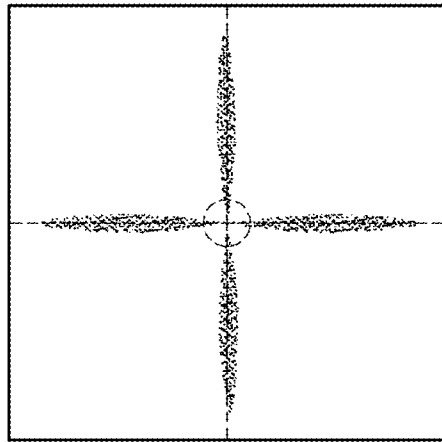


FIG - 14

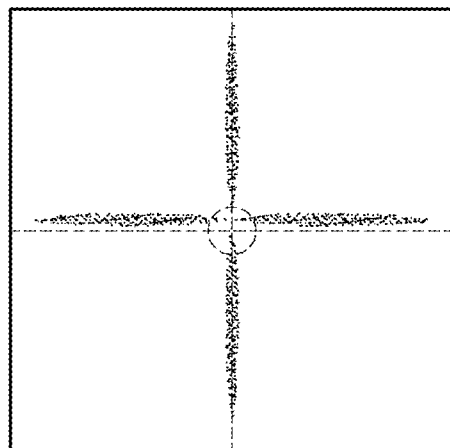


FIG - 15

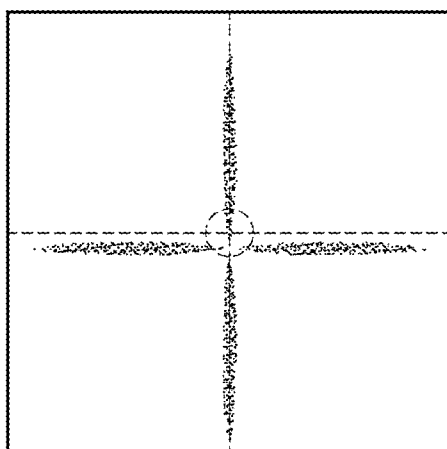


FIG - 16

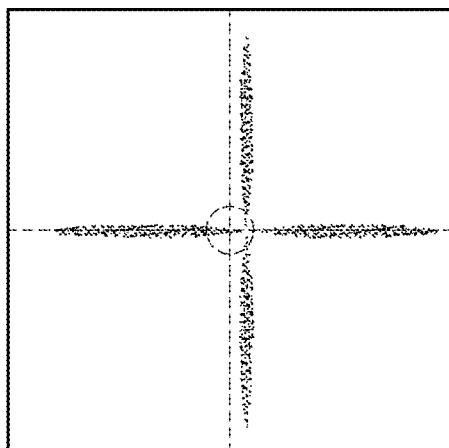


FIG - 17

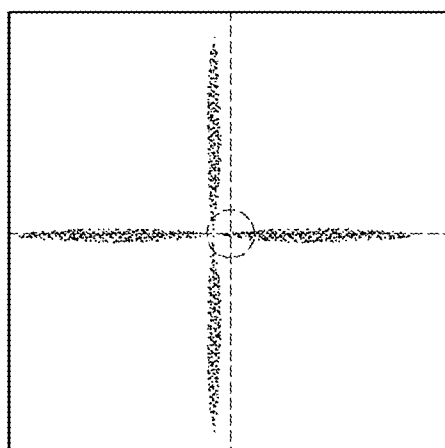


FIG - 18

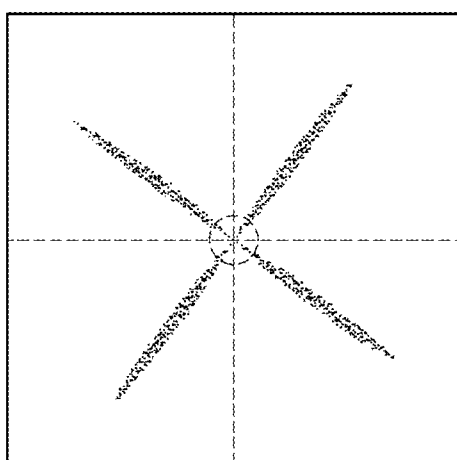
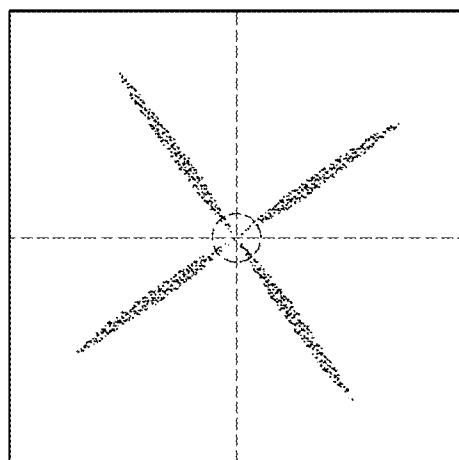
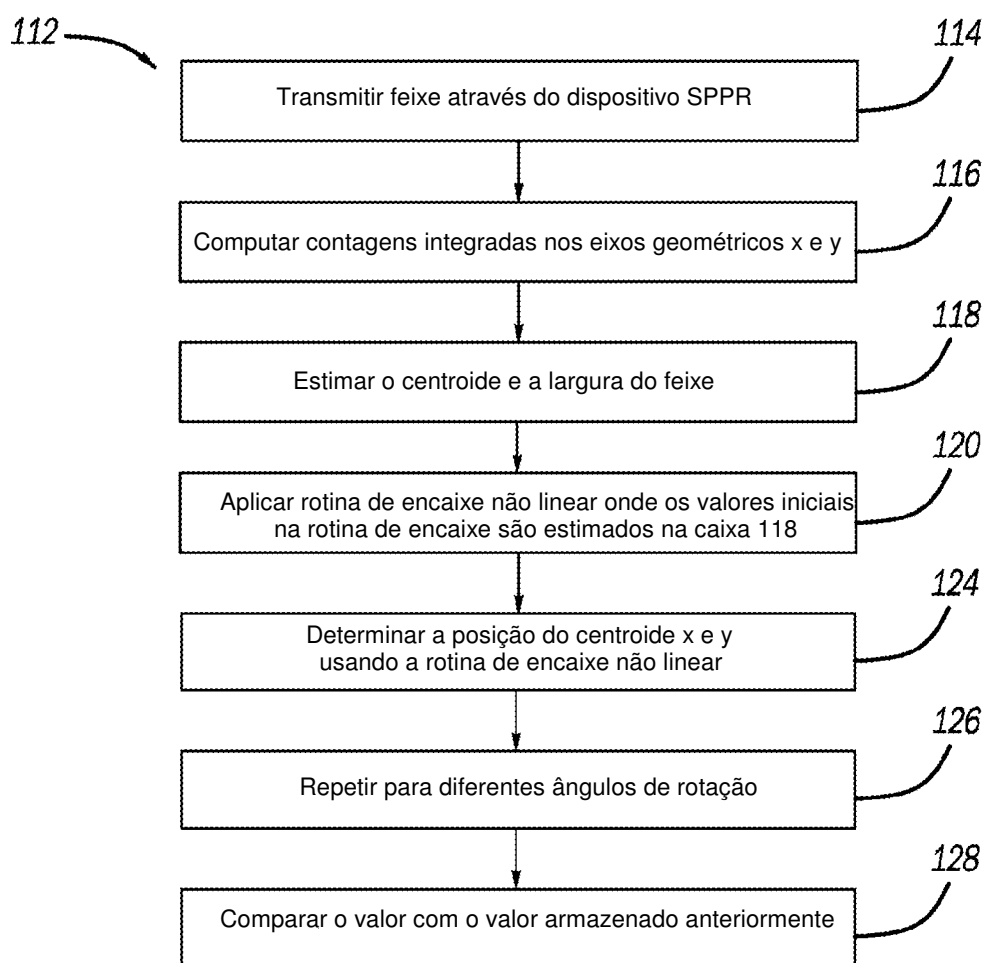
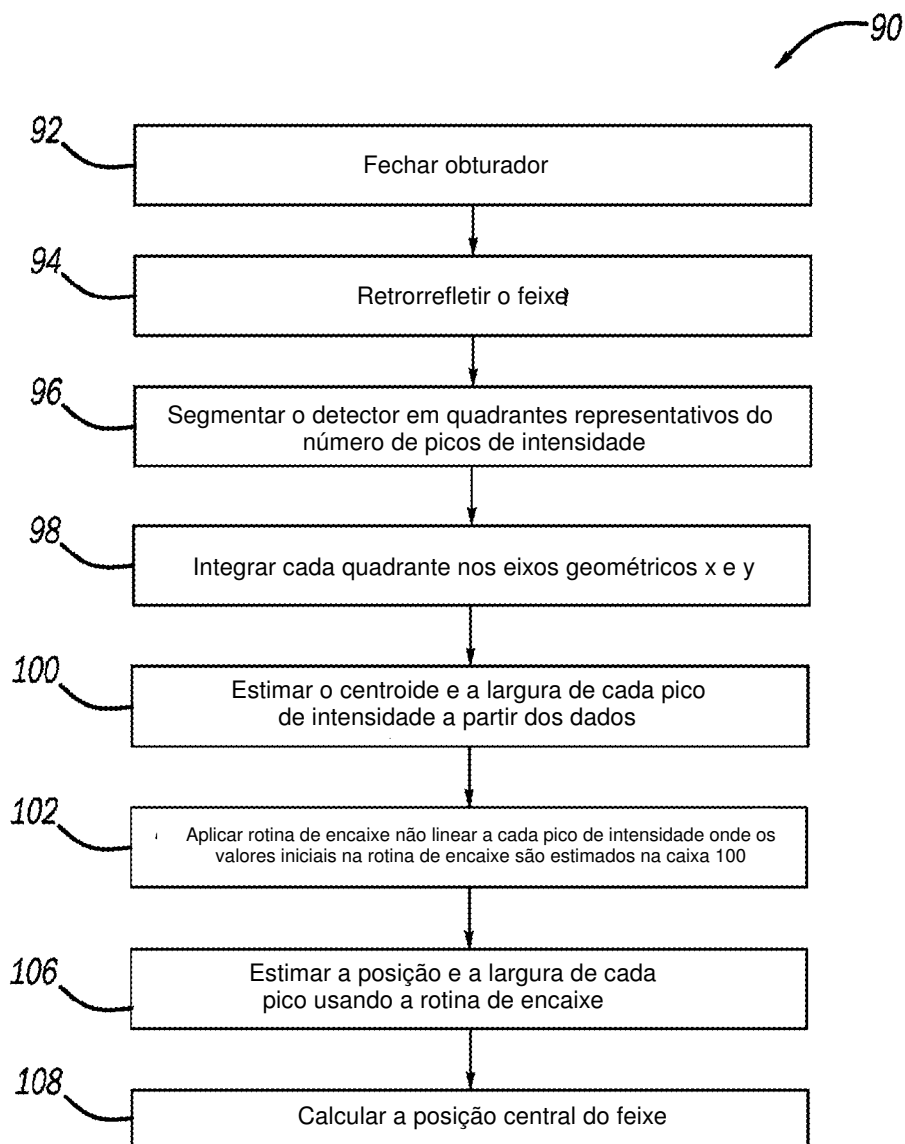
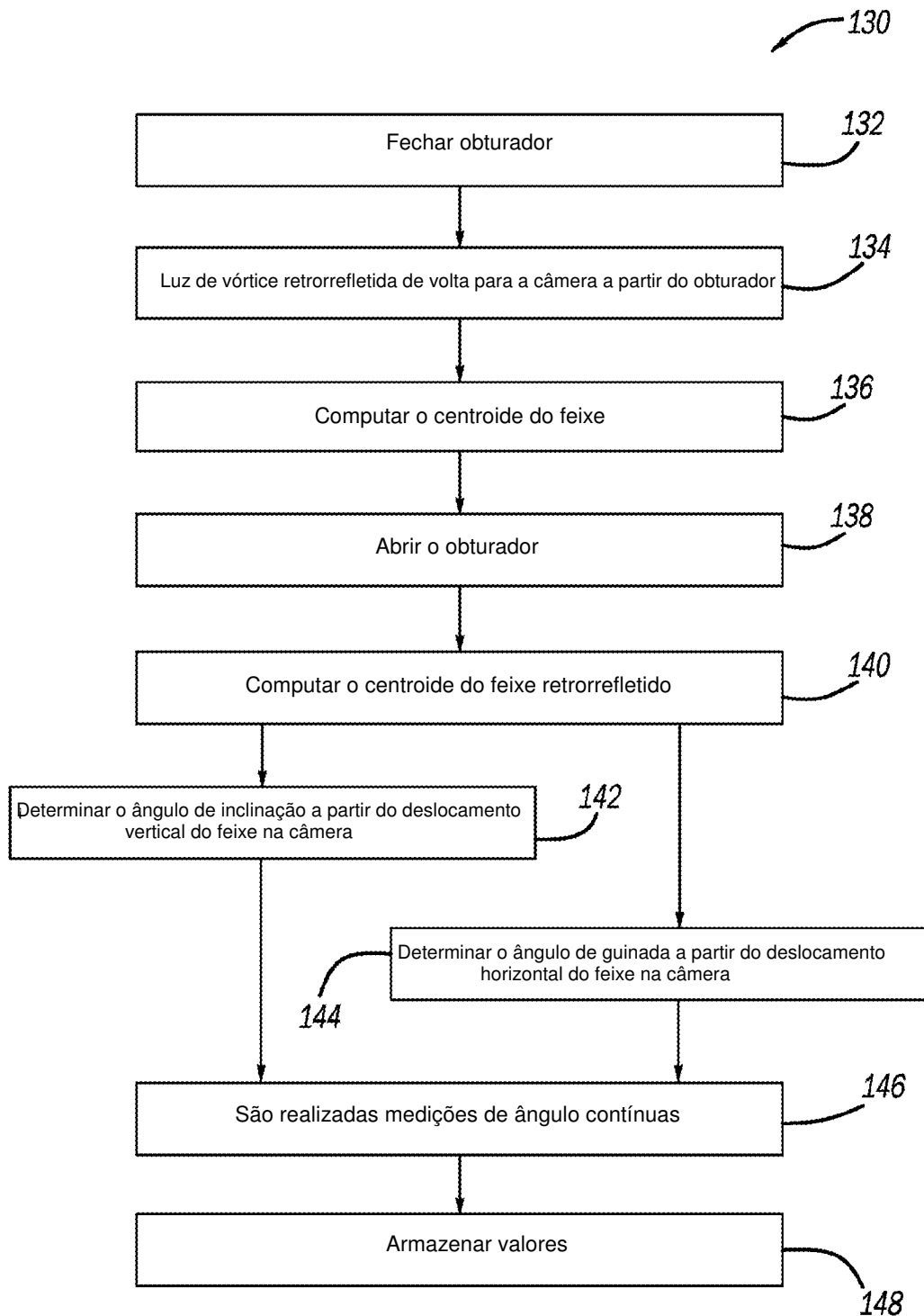
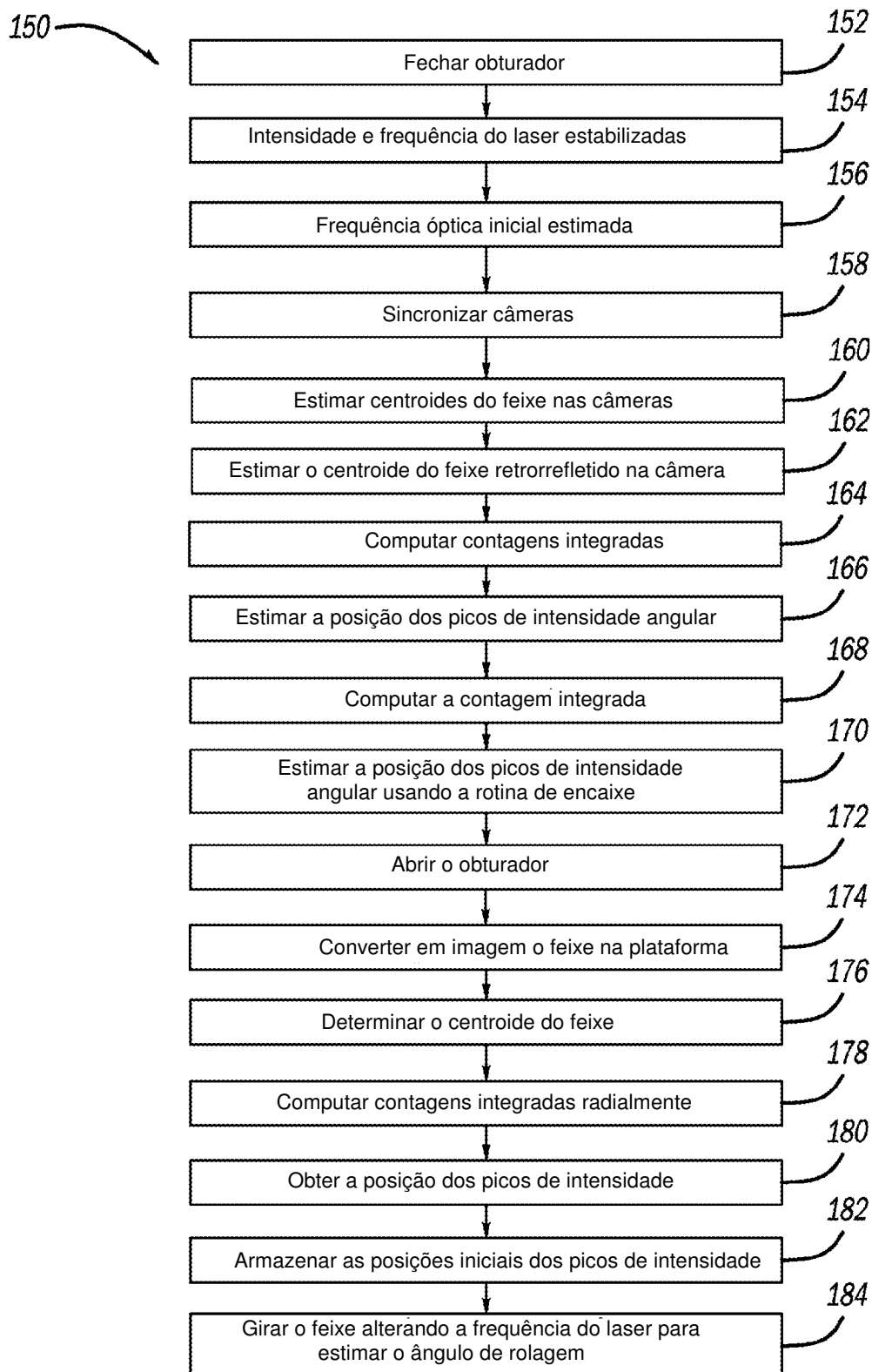


FIG - 19

FIG - 20FIG - 22

FIG - 21

**FIG - 23**

**FIG - 24**