



Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

⑫ **FASCICULE DU BREVET** A5

⑲ Numéro de la demande: 2517/84

⑳ Date de dépôt: 22.05.1984

㉑ Brevet délivré le: 31.10.1986

㉒ Fascicule du brevet
publié le: 31.10.1986

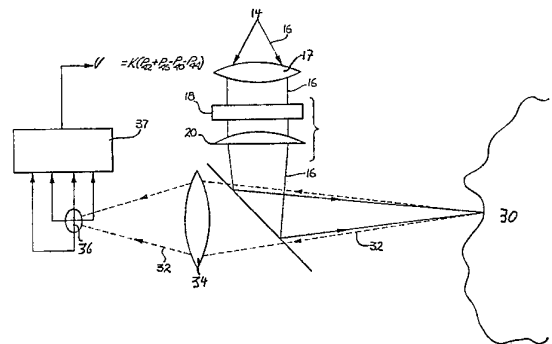
㉓ Titulaire(s):
Spectron Development Laboratories, Inc., Costa
Mesa/CA (US)

㉔ Inventeur(s):
Doty, James L., Laguna Niguel/CA (US)

㉕ Mandataire:
Katzarov SA, Genève

⑤④ **Sonde optique astigmatique sans contact.**

⑤⑦ Elle est particulièrement destinée à être utilisée pour relever les cartes de contours et jauger de petites distances. Elle comprend une source de lumière (14) projetant un faisceau de lumière (16) à travers un collimateur (17) et deux lentilles cylindriques et croisées (18, 20) pour induire artificiellement de l'astigmatisme. Le faisceau astigmatique est ensuite dirigé sur une surface cible (30) dont on veut relever la carte. La lumière rétrodiffusée (32) est captée par un capteur à quadrants (36). La forme de l'image projetée sur le photodétecteur dépend de la distance entre la sonde et la surface. Une électronique (37) traitant la sortie du capteur (36) permet de mesurer la distance entre la sonde et la surface ou de la maintenir constante et une carte du contour peut être établie en utilisant les techniques connues.



REVENDECATIONS

1. Sonde optique destinée à déterminer les caractéristiques d'une surface cible en passant la sonde sur la surface, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de projection pour projeter un faisceau astigmatique de lumière sur cette surface cible, des moyens capteurs pour capter une partie du faisceau de lumière rétrodiffusée depuis cette surface, des moyens de détection couplés auxdits moyens capteurs pour déterminer la position de la sonde relativement à la surface sur la base de la dispersion du faisceau astigmatique sur la surface, en raison de l'astigmatisme de celui-ci.

2. Sonde optique selon la revendication 1, caractérisée en ce que les moyens de détection comprennent un détecteur photoélectrique.

3. Sonde optique selon la revendication 2, caractérisée en ce que les moyens de projection comprennent deux lentilles cylindriques disposées à 90° l'une par rapport à l'autre, cela pour produire le faisceau astigmatique.

4. Sonde optique selon la revendication 3, caractérisée en ce que le détecteur comprend au moins deux éléments détecteurs, dont chacun produit un signal de sortie en réponse à la lumière qu'il reçoit.

5. Sonde optique selon la revendication 4, caractérisée en ce que la section transversale du faisceau astigmatique varie en fonction de la distance entre la sonde et la surface.

6. Sonde optique selon la revendication 5, caractérisée en ce que les moyens capteurs comprennent une lentille de formation d'image pour capter le faisceau astigmatique rétrodiffusé qui est réfléchi depuis la surface.

7. Sonde optique selon la revendication 6, caractérisée en ce que les moyens de projection comprennent des moyens générateurs de lumière.

8. Sonde optique selon la revendication 7, caractérisée en ce que lesdits moyens de projection comprennent en outre une lentille collimatrice disposée entre les moyens générateurs de lumière et les lentilles cylindriques.

9. Sonde optique selon la revendication 8, caractérisée en ce qu'elle comprend un diviseur de faisceau pour diriger le faisceau astigmatique sur la surface.

10. Sonde optique selon la revendication 5, caractérisée en ce que le faisceau astigmatique forme une image de section générale circulaire en son foyer central.

11. Sonde optique selon la revendication 10, caractérisée en ce que le détecteur comprend quatre éléments a, b, c, d sensibles à la lumière (40, 42, 44, 46), les sorties de ces éléments du détecteur étant représentées par les relations suivantes:

$$V_{out} = KP_-$$

$$V_o = KP_+$$

où

$$V_{out} = \text{Tension de sortie totale du détecteur}$$

$$K = \text{Constante de proportionnalité}$$

$$P_- = P_{42} + P_{46} - P_{40} - P_{44}$$

$$P_+ = P_{42} + P_{46} + P_{40} + P_{44}$$

$$P_{40} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément a (40)}$$

$$P_{42} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément b (42)}$$

$$P_{44} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément c (44)}$$

$$P_{46} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément d (46)}$$

12. Sonde optique destinée à être utilisée pour déterminer des caractéristiques d'une surface cible en passant la sonde sur la surface, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de projection destinés à projeter un faisceau de lumière sur la surface cible, des moyens capteurs destinés à capter une partie du faisceau rétrodiffusé depuis la surface et à introduire de l'astigmatisme dans ledit faisceau capté, des moyens détecteurs couplés aux moyens collecteurs et destinés à déterminer la position de la sonde relativement à la surface sur la base de la détection de la dispersion induite dans le faisceau astigmatique capté en raison de l'astigmatisme de celui-ci.

13. Sonde optique selon la revendication 12, caractérisée en ce que la section transversale du faisceau astigmatique capté varie en fonction de la distance entre la sonde et la surface.

14. Sonde optique selon la revendication 13, caractérisée en ce que les moyens capteurs comprennent deux lentilles cylindriques disposées à 90° l'une par rapport à l'autre pour induire l'astigmatisme dans le faisceau capté.

15. Sonde optique selon la revendication 14, caractérisée en ce que les moyens de détection comprennent un photodétecteur comprenant au moins deux quadrants sensibles à la lumière pour produire des signaux indiquant la quantité de lumière reçue par chaque quadrant.

16. Sonde optique selon la revendication 15, caractérisée en ce que le photodétecteur comprend quatre quadrants a, b, c et d (40, 42, 44, 46) présentant des surfaces sensibles à la lumière d'égales grandeurs.

17. Sonde optique selon la revendication 16, caractérisée en ce que la tension de sortie du détecteur à quadrants est déterminée par les relations suivantes:

$$V_{out} = KP_-$$

$$V_o = KP_+$$

où

$$V_{out} = \text{Tension de sortie totale du détecteur}$$

$$K = \text{Coefficient de proportionnalité}$$

$$P_- = P_{42} + P_{46} - P_{40} - P_{44}$$

$$P_+ = P_{42} + P_{46} + P_{40} + P_{44}$$

$$P_{40} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément a (40)}$$

$$P_{42} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément b (42)}$$

$$P_{44} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément c (44)}$$

$$P_{46} = \text{Puissance optique venant frapper l'élément d (46)}$$

18. Sonde optique selon la revendication 17, caractérisée en ce que les moyens de projection comprennent une source de lumière et une lentille collimatrice.

La présente invention se rapporte à une sonde optique utilisée en métrologie dimensionnelle et plus particulièrement à l'établissement sans contact de cartes de surface, à l'aide d'une sonde de mesure optique selon la partie introductive des revendications 1 et 12.

Dans différentes applications scientifiques et techniques, il peut être souhaité d'obtenir le profil de la surface d'un objet. Par exemple, le développement de véhicules de terre, d'air et d'espace nécessite l'établissement de cartes de contour de différentes surfaces des véhicules afin de permettre une analyse correcte des caractéristiques mécaniques et aérodynamiques. Des modifications du projet peuvent ensuite être entreprises et une carte d'un contour amélioré peut être produite en vue de permettre une nouvelle optimisation du projet. De plus, dans certains cas, la description du contour d'un objet est importante pour le contrôle de la fabrication et de la qualité. Les composants soumis à des efforts élevés, tels que les engrenages, les ailettes de turbines et de ventilateurs, etc., doivent être usinés avec des tolérances très élevées. Souvent, on établit une carte détaillée du contour d'un objet en vue de son utilisation comme gabarit et standard de qualité lors d'une production de masse ultérieure.

Différentes sondes ont été développées pour permettre d'établir une carte du contour d'une surface cible. Par exemple, il existe des sondes de contact à usages multiples, de haute précision et bon marché. Toutefois, les sondes de contact abîment, dans une certaine mesure, la surface contrôlée et leur pointe palpeuse s'use. Si une erreur est commise dans le positionnement de la sonde, la sonde et la surface peuvent être gravement endommagées. De plus, dans certains cas, la surface cible, par exemple une ailette de compresseur,

est tellement mince qu'une sonde à contact peut la déformer et introduire ainsi des erreurs de mesure.

Pour éviter les difficultés rencontrées lors de l'utilisation des sondes de contact pour l'établissement des cartes de contours, on a essayé différentes techniques de traçage sans contact de profils. Un système utilisant l'interférométrie optique ponctuelle conduit à une précision élevée, mais est souvent trop sensible dans certaines applications. Les procédés utilisant l'interférométrie optique ponctuelle nécessitent des composants optiques coûteux, un alignement critique de l'appareillage optique, une bonne résolution contre les vibrations et un traitement électronique sophistiqué.

On a développé d'autres techniques utilisant l'interférométrie optique de surface qui, de même que l'interférométrie ponctuelle, requiert des composants coûteux, une isolation contre les vibrations et un traitement sophistiqué du signal. De plus, l'interférométrie optique de surface s'est révélée très sensible aux défauts d'alignement et doit recourir à des procédés longs et complexes de traitement de l'image pour diminuer les franges obtenues. Cette technique est limitée à l'inspection de cibles dont les surfaces sont hautement polies, réfléchies de façon spectaculaire et sujettes au même alignement critique que celui nécessaire pour le système de mesure. D'autres techniques sans contact sont décrites dans les mémoires des brevets U.S N^{os} 3 481 672, 3 679 307 et 4 299 491.

On voit ainsi que le besoin existe pour une sonde optique sans contact, simple et précise et destinée à être utilisée dans l'établissement de cartes de contours de surfaces et la mesure de petites distances. La présente invention est caractérisée par les parties caractérisantes des revendications 1 et 12. Elle a pour objet une sonde de mesure optique sans contact qui permet l'établissement d'une carte détaillée du contour d'une surface cible et qui n'est pas sujette à un alignement critique et à des problèmes de vibrations tels que ceux rencontrés dans les dispositifs connus. Comme il découlera de la description qui suit, l'invention trouve de nombreuses autres applications en métrologie dimensionnelle, en plus du profilage de surfaces.

On va décrire une sonde optique perfectionnée destinée notamment à être utilisée dans l'établissement des cartes de contours de surfaces et les systèmes de jauge à petite distance. La sonde comprend un laser ou autre source de lumière, qui projette un faisceau de lumière à travers des lentilles cylindriques croisées, pour induire artificiellement de l'astigmatisme dans le faisceau. Le faisceau astigmatique est ensuite projeté sur la surface à tracer, en utilisant des moyens directeurs de lumière appropriés. Le rayonnement rétrodiffusé, réfléchi depuis la surface cible, est capté par des moyens capteurs et focalisé sur un photodétecteur ou autres moyens appropriés de détection de rayonnement. La forme du faisceau de lumière astigmatique projeté varie en fonction de la distance avec la sonde optique. Un point situé en aval de la sonde optique où le faisceau optique forme un spot de forme générale circulaire est défini comme point focal central «nul» ($Z = 0$). En amont de ce point vers la sonde optique, le faisceau astigmatique forme un spot elliptique (en $Z = Z_0$) et pareillement en aval du point Zéro le faisceau forme un spot elliptique (en $Z = + Z_0$) qui est tourné sensiblement de 90° relativement au spot aval Z_0 . Ainsi, la forme de l'image projetée sur le photodétecteur par les moyens capteurs dépend de la distance entre la sonde optique et la surface cible.

En conséquence, en observant la sortie de chaque élément du photodétecteur, la distance entre la sonde et la surface cible peut être maintenue constante et une carte du contour de la surface peut être établie en utilisant les techniques connues d'établissement de cartes.

Une autre forme d'exécution est prévue dans laquelle un faisceau de lumière non astigmatique est projeté sur la surface à reproduire. Le rayonnement rétrodiffusé réfléchi par la surface cible est capté et passé à travers des lentilles cylindriques croisées pour induire l'astigmatisme dans le faisceau reçu. Le faisceau astigmatique est ensuite focalisé sur un photodétecteur. Comme dans le cas de la première forme d'exécution, la forme du faisceau reçu est fonction de la distance entre la sonde et la surface cible, ce qui permet d'établir une

carte du contour. Le dessin annexé représente, à titre d'exemple, deux formes d'exécution de la sonde:

la figure 1 illustre la projection d'un faisceau de lumière astigmatique sur un détecteur à quadrants selon la présente invention;

la figure 2 est une représentation schématique d'une première forme d'exécution;

la figure 3 est une représentation graphique de l'induction de l'astigmatisme dans un faisceau de lumière en utilisant des lentilles cylindriques croisées;

la figure 4 est un graphique représentant la sortie électrique du détecteur à quadrants de la figure 1 en fonction de la distance entre la sonde selon l'invention et la surface cible;

la figure 5 est une variante de la forme d'exécution représentée à la figure 2, et

la figure 6 est une représentation graphique de l'utilisation de la présente invention pour obtenir le tracé du contour de la surface d'un objet cible.

On va décrire une sonde optique sans contact destinée à être utilisée dans l'établissement des cartes de contours de surfaces et le calibrage de petites distances. Dans la description qui suit, on mentionne de nombreux détails tels que nombres spécifiques, lentilles, matériaux et configurations afin de permettre une parfaite compréhension de la présente invention. Toutefois, il est clair pour les hommes du métier que l'invention peut être mise en œuvre sans ces détails spécifiques. Dans d'autres cas, des composants bien connus tels que détecteurs, moyens de traitement électriques, etc., n'ont pas été décrits en détail pour ne pas compliquer inutilement la description.

La figure 1 représente une sonde 10, qui projette un faisceau de lumière astigmatique 12 sur la surface cible dont la carte doit être établie. La forme de la section transversale du faisceau de lumière 12 varie en fonction de la distance de la sonde 10. Comme représenté, la forme du faisceau de lumière astigmatique 12 est sensiblement circulaire en un point défini comme étant le foyer central (CF) du faisceau ($Z = 0$). En amont ($Z = Z_0$) vers la sonde 10, le faisceau de lumière 12 prend la forme d'une ellipse orientée sensiblement verticalement. La forme en aval ($Z = Z_0$) du faisceau 12 est une ellipse orientée sensiblement de 90° par rapport à la forme en amont. Comme on le discutera plus loin, l'utilisation d'un faisceau astigmatique permet de maintenir avec précision la distance entre la sonde 10 et la surface cible afin d'établir la carte du contour d'une surface cible.

On va maintenant décrire la forme d'exécution illustrée à la figure 2. La sonde optique sans contact 10 comprend une source de lumière 14 constituée par un laser, une diode émettrice de lumière ou analogue, et destinée à émettre une lumière de longueur d'onde voulue. La lumière émise 16 est passée à travers une lentille collimatrice 17 afin de former des rayons sensiblement parallèles.

De l'astigmatisme est introduit artificiellement dans le faisceau de lumière 16 en utilisant deux lentilles cylindriques croisées 18 et 20. Comme on le voit le mieux à la figure 3, l'utilisation, dans l'invention, de lentilles cylindriques croisées induit l'astigmatisme voulu dans le faisceau 16, de manière à former un spot sensiblement circulaire au foyer central (CF) du faisceau astigmatique. Ce foyer central est défini par $Z = 0$ le long d'un axe Z passant sensiblement perpendiculairement à travers les lentilles 18 et 20, comme illustré à la figure 3. La forme du faisceau 16 en amont du foyer central ($Z = Z_0$) est une ellipse dont l'axe principal est orienté verticalement et parallèlement à l'axe longitudinal principal de la lentille cylindrique 20. En aval du foyer central ($Z = + Z_0$), la forme du faisceau 16 est de nouveau une ellipse, mais dont l'axe principal est tourné d'environ 90° par rapport à l'ellipse amont. Ainsi, la forme du faisceau 16 en $Z = + Z_0$ est celle d'une ellipse dont l'axe principal est parallèle à l'axe longitudinal de la lentille cylindrique 18. La section transversale du faisceau 16 dépend ainsi de la distance depuis les lentilles croisées. On notera que, bien que l'invention utilise des lentilles cylindriques croisées pour induire de l'astigmatisme artificiel, d'autres procédés semblables, faisant usage de combinaisons de lentilles ou

analogues, peuvent également être utilisés pour obtenir le même résultat.

En se reportant à nouveau à la figure 2, on voit que le faisceau 16, après avoir passé à travers les lentilles croisées 18 et 20, est envoyé, par exemple par un séparateur de faisceau 28, sur la surface cible 30 dont la carte doit être établie.

La surface 30 disperse le faisceau 16 en fonction de la nature de cette surface. Par exemple, si la surface cible 30 est relativement lisse, une partie importante du faisceau 16 sera réfléchi. Si la surface cible 30 est rugueuse, ou piquée et inégale, le faisceau 16 sera plus ou moins dispersé. Comme on le verra plus loin, bien que les caractéristiques de surface de la surface cible 30 fassent varier la quantité de lumière réfléchi, dispersée ou absorbée, la sortie globale obtenue selon l'invention dépend de la distance entre la sonde et la surface 30.

La lumière rétrodiffusée 32, qui a été réfléchi par la surface cible 30, est captée par la lentille d'objectif 34 et focalisée sur un détecteur à quadrants 36 couplé à une électronique appropriée 37. Bien que la présente invention utilise une lentille d'objectif 34 pour capter le rayonnement dispersé du faisceau 16 qui a été projeté sur la surface cible 30, il est clair que d'autres moyens collecteurs peuvent être utilisés pour obtenir le même résultat.

Comme on le voit le mieux à la figure 1, le détecteur à quadrants 36 comprend quatre éléments photosensibles 40, 42, 44 et 46.

Lorsque la distance entre les lentilles cylindriques croisées 18 et 20 et la surface cible 30 est égale à la distance au foyer central, la radiation rétrodiffusée 32 focalisée sur le détecteur 36 forme un spot sensiblement symétrique et circulaire 35. Ainsi, les sorties des quadrants sont sensiblement égales. Dans le cas où la surface cible 30 tombe à l'intérieur de la partie amont du faisceau astigmatique 16 qui a une forme générale elliptique avec l'axe principal parallèle à l'axe y (voir figure 3), la sortie combinée des quadrants 40 et 44 dépasse celle des quadrants 42 et 44. Inversement, si la surface cible tombe dans la partie aval du faisceau astigmatique qui présente une section transversale elliptique disposée à 90° de la section transversale amont, la sortie des éléments photosensibles 42 et 46 dépasse la sortie des éléments 40 et 44 du détecteur 36.

Les sorties des quatre éléments sont sommées et soustraites pour produire des tensions de la forme:

$$V_{out} = KP$$

$$V_o = KP_+$$

où

$$K = \text{Constante de proportionnalité}$$

$$P = P_{42} + P_{46} P_{40} P_{44}$$

$$P_+ = P_{42} P_{46} + P_{40} + P_{44}$$

$$P_m = \text{Puissance optique totale venant frapper chacun des éléments détecteurs } m \text{ où } m = 40, 42, 44 \text{ ou } 46.$$

La figure 4 représente la sortie V_{out}/V_o reportée en fonction de la distance entre la surface cible 30 et le foyer central 16 de la sonde 10. La distance depuis le foyer central du faisceau astigmatique 16 est mesurée le long de l'abscisse de la figure 4, et la sortie du détecteur normalisée par V_{out}/V_o est reportée en ordonnée.

Comme prévu, la sortie du détecteur atteint son maximum lorsque le détecteur 36 est situé au voisinage de l'un de ses foyers (Z_o et $+Z_o$). Entre les deux foyers, elle est généralement linéaire et n'a qu'une valeur. A l'extérieur des deux foyers, le signal tend asymptotiquement vers zéro.

Bien que la forme d'exécution actuellement préférée utilise un photodétecteur 36 à quatre quadrants, il est clair que d'autres combinaisons d'éléments détecteurs sont possibles. Par exemple, l'invention peut utiliser de façon satisfaisante un détecteur à deux éléments. Dans ce cas, la sortie de chaque élément est comparée afin d'identifier la position de la sonde 10 relativement à la surface cible 30, cela en se fondant sur la nature du rayonnement rétrodiffusé.

La figure 5 illustre une autre forme d'exécution de l'invention.

Les éléments de la forme d'exécution selon la figure 5, qui sont les mêmes que ceux décrits en regard de la figure 2, sont référencés par les mêmes chiffres, pour simplifier. La source de lumière 14 émet un faisceau de lumière 42 qui traverse une lentille collimatrice 44 afin de projeter le faisceau sur une surface cible 30. Le rayonnement rétrodiffusé 50 réfléchi depuis la surface 30 est dirigé par un séparateur de faisceau 52 ou analogue vers les lentilles cylindriques croisées 54 et 56. Comme dans la forme d'exécution selon la figure 2, les lentilles croisées 54 et 56 induisent artificiellement de l'astigmatisme dans le faisceau capté 50 et focalisent le faisceau sur un détecteur à quadrants 36 couplé à une électronique appropriée 37. Comme décrit précédemment, la sortie du détecteur à quadrants 36 produit des signaux indiquant la position de la sonde 10 relativement à la surface cible 30. On a constaté que l'utilisation du système de réception astigmatique illustré à la figure 5 produit une sortie de détecteur sensiblement la même que celle représentée à la figure 4. Les deux formes d'exécution des figures 2 et 5 utilisent de l'astigmatisme formé artificiellement afin de faire varier la géométrie du faisceau dirigé sur un détecteur à quadrants en fonction de la distance entre la sonde 10 et la surface cible.

La figure 6 illustre une application possible de la présente invention. La sonde 10 est couplée, par une articulation 60, à une machine 62 pour mesurer les coordonnées. L'articulation 60 comprend des liaisons transductrices 64, 66 et 68 pour permettre au bras 60 de se déplacer dans trois dimensions (X, Y, Z). Pour obtenir une carte du contour de la surface, constituée par les coordonnées X, Y, Z des points d'une cible (par exemple l'avion Zo), le bras articulé 60 est maintenu à une distance de mesure constante «d» de la cible 70. Cette distance d est égale à la distance entre le foyer central du faisceau astigmatique et la sonde 10. Le signal de sortie selon l'invention, pour cette distance de mesure, est défini comme le point «Zéro» ($Z = 0$). Le signal de sortie de la sonde 10 peut ensuite être utilisé pour contrôler la position de la sonde de manière que le foyer central soit maintenu sur la surface cible. Ainsi, le bras articulé 60 peut être utilisé pour déplacer la sonde sur la surface 70 tout en maintenant une distance de mesure constante. Les coordonnées (X, Y, Z) de chaque point de la cible 70 sur laquelle passe la sonde peuvent être obtenues par un traitement approprié des signaux fournis par les transducteurs 64, 66 et 68, de manière qu'une carte du contour de la surface de la cible soit établie relativement à un point de départ choisi arbitrairement comme origine.

On notera que, bien que la figure 6 illustre une utilisation de l'invention dans laquelle la sonde 10 est utilisée pour maintenir le bras articulé à une distance constante de la surface cible, cette sonde peut également être utilisée pour mesurer directement des variations de la surface cible. La plage de mesure de la sonde 10 sera généralement définie comme étant la distance comprise entre les deux foyers Z_o et $+Z_o$. Pour autant que la sortie du détecteur 36 est sensiblement linéaire entre chacun des foyers, on peut détecter de petits changements de contour et de distances. Ainsi, la présente invention est utile pour maintenir le contrôle de la qualité pour des objets à tolérances étroites tels par exemple qu'engrenages, milieux d'emmagasinage magnétiques, etc. Pour une plus grande précision, on peut utiliser des moyens de traitement non linéaires pour linéariser le signal sur une gamme de mesure étendue.

Ainsi, on a présenté une sonde optique sans contact, perfectionnée et destinée à être utilisée particulièrement dans l'établissement de cartes de contours et la mesure de petites distances.

La sonde est simple, fiable et peut aisément être interfacée avec des dispositifs mécaniques et électriques existants pour relever les cartes de contours.

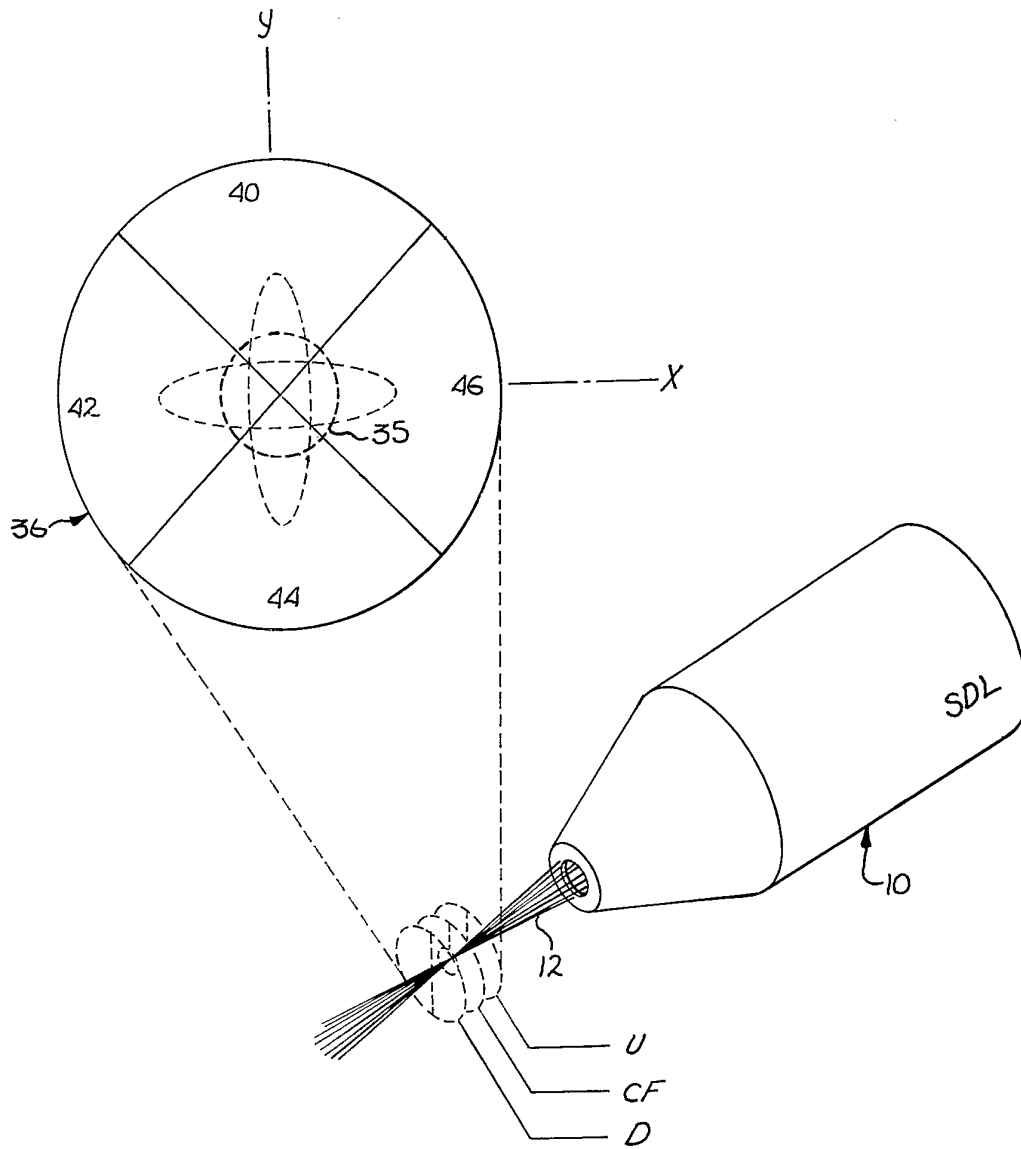


Fig. 1

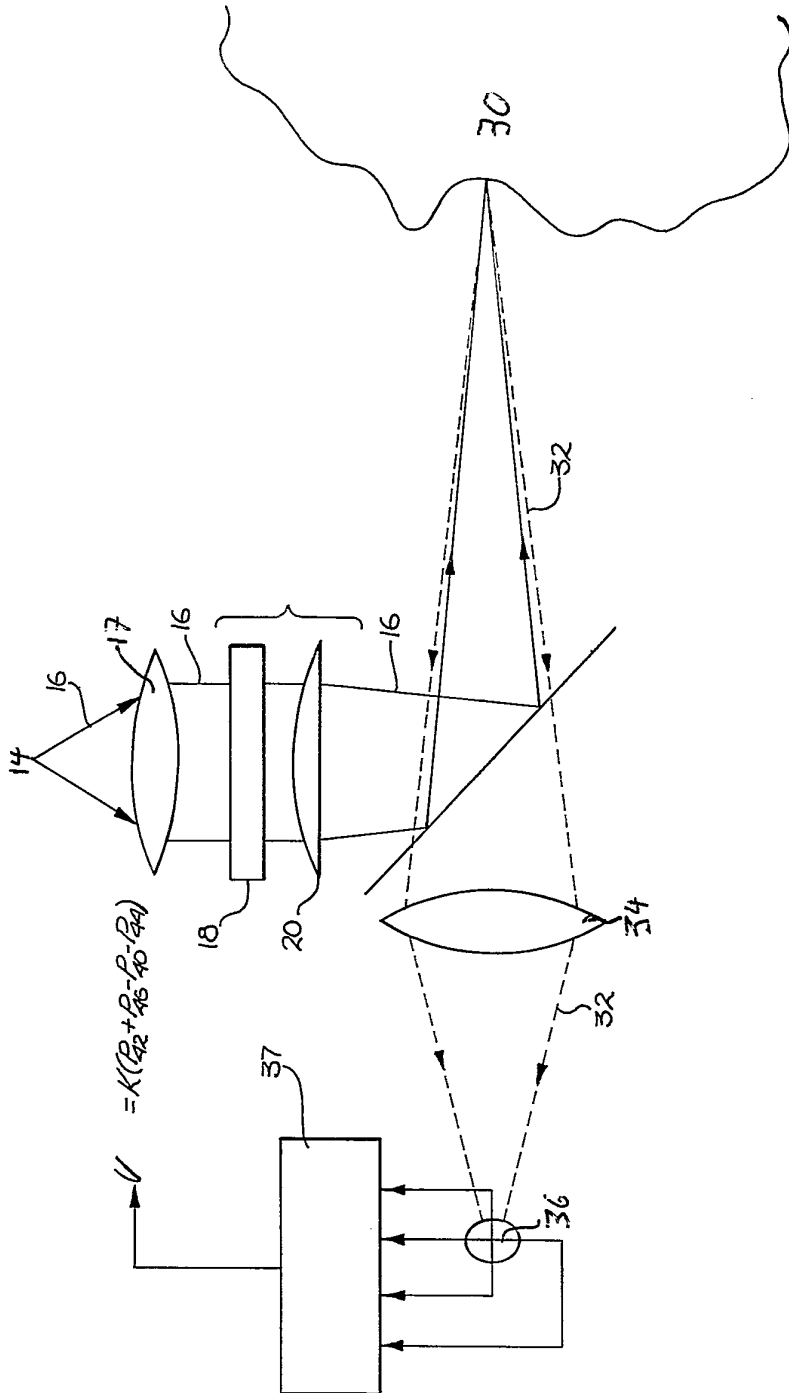
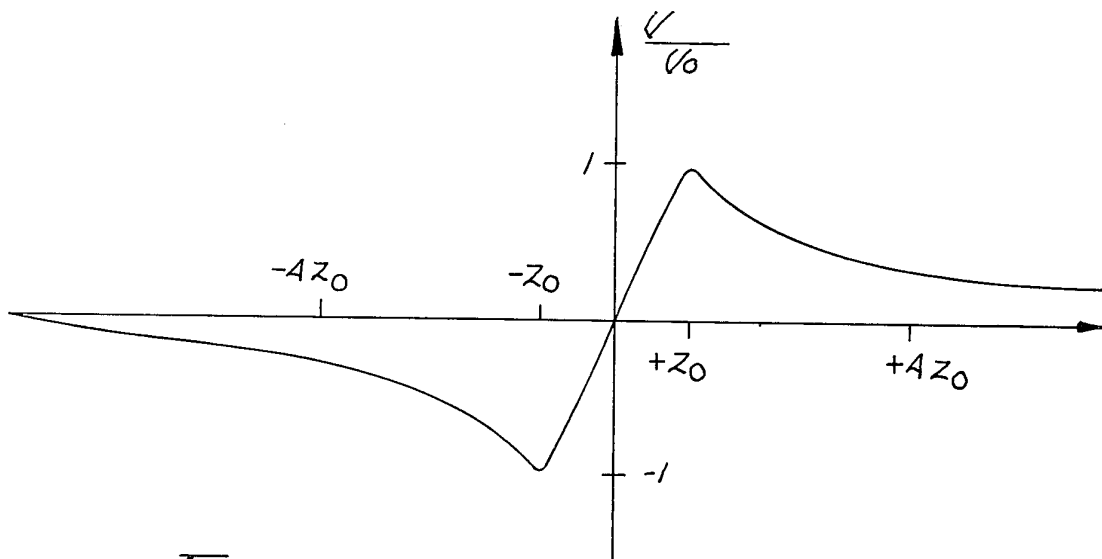
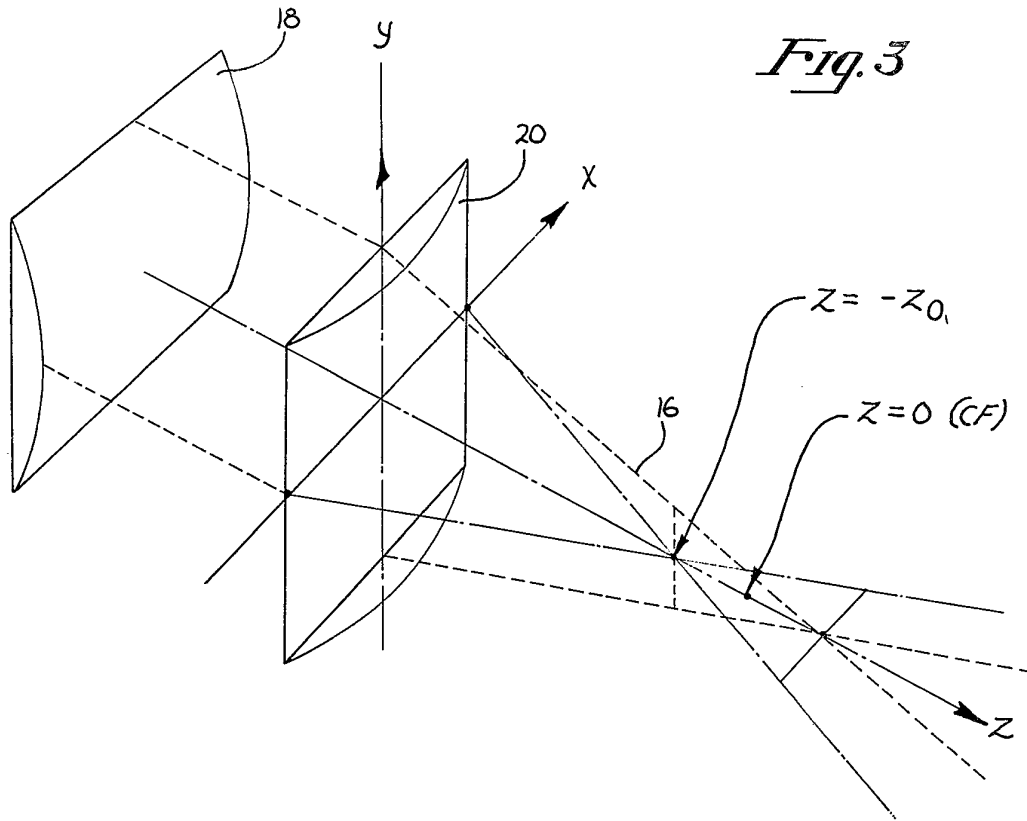


Fig.2

*Fig. 4*

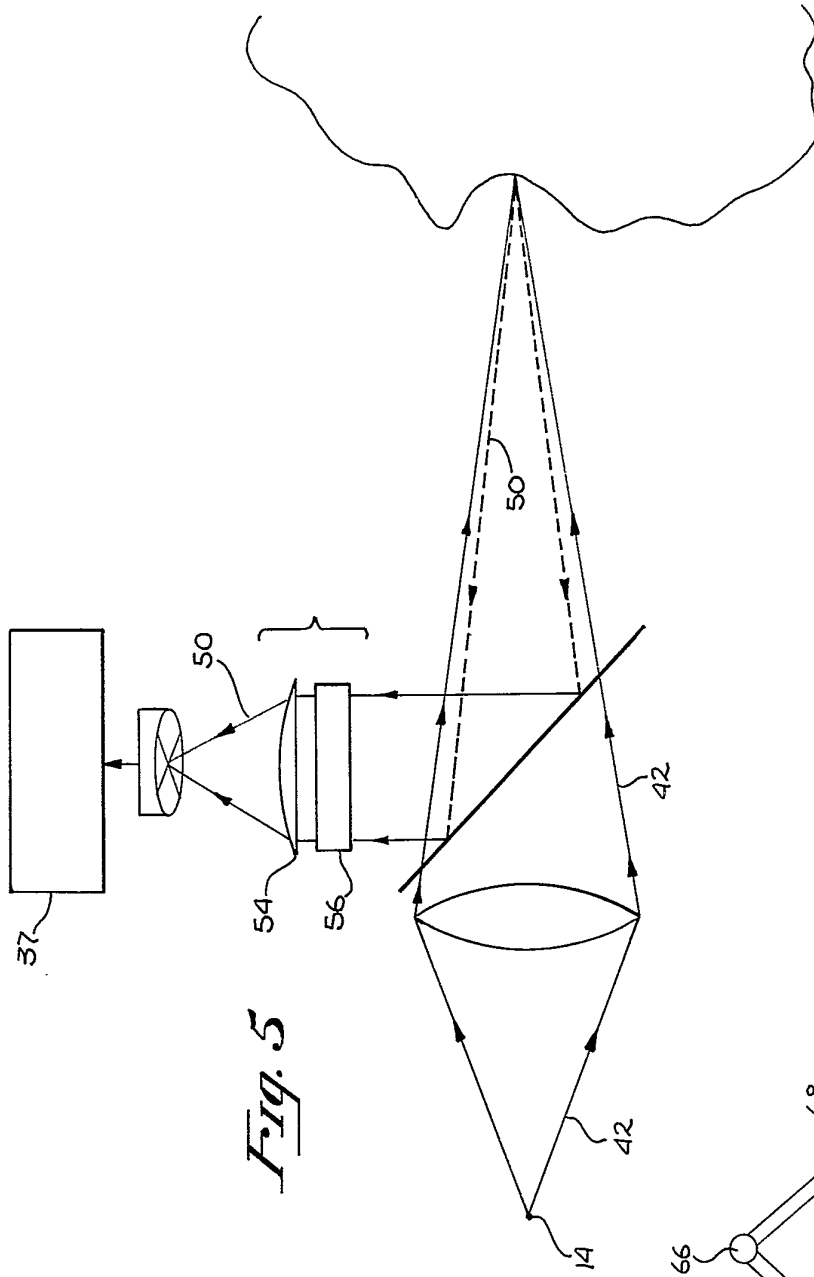


Fig. 5

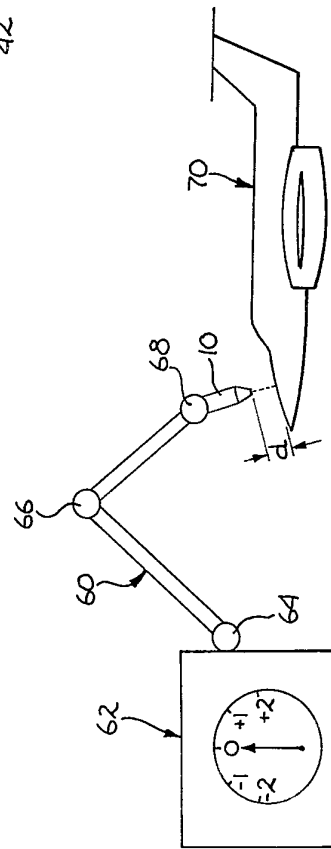


Fig. 6