

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

⑫

N° 79 21710

⑤④ Appareil de métrologie capacitive pour la mesure de sections droites d'une pièce.

⑤① Classification internationale (Int. Cl. ³). G 01 B 7/28; G 01 C 25/00.

⑫② Date de dépôt..... 29 août 1979.

③③ ③② ③① Priorité revendiquée :

④① Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 10 du 6-3-1981.

⑦① Déposant : OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES, ONERA,
résidant en France.

⑦② Invention de : Bernard Foulon et Michel Gay.

⑦③ Titulaire : *Idem* ⑦①

⑦④ Mandataire : André Netter, conseil en brevets d'invention,
40, rue Vignon, 75009 Paris.

L'invention a pour objet un appareil pour la mesure des dimensions et des irrégularités de surface d'une pièce par rapport à une référence, notamment pour la mesure de sections droites d'une pièce.

- 5 On souhaite, dans certains cas, mesurer avec une précision extrême des dimensions de pièces mécaniques, notamment de pièces de révolution, destinées à entrer dans la constitution d'ensembles dont le bon fonctionnement dépend de la précision dimensionnelle desdites pièces.
- 10 C'est le cas, par exemple, de pièces métalliques cylindriques devant entrer dans la constitution de gyroscopes ou autres ensembles inertiels. La vérification de la conformité dimensionnelle de telles pièces est une condition du bon fonctionnement de ces ensembles.
- 15 Le Demandeur a déjà proposé d'effectuer une mesure dimensionnelle de très haute précision à l'aide d'un sphéromètre capacitif. Dans cet appareil, la sphère ou bille, métallique, à mesurer ou à vérifier, est placée sur un pivot et tourne entre deux capteurs capacitifs, diamétralement opposés, reliés à un capacimètre. Les capteurs ont chacun une armature
- 20 disposée en regard de la sphère de sorte que la capacité électrique entre lesdites armatures et la sphère est une mesure de la distance les séparant de la sphère et permet de déterminer le diamètre de la sphère dans la position considérée.
- 25 L'appareil selon l'invention, qui fait utilisation de l'effet capacitif pour la mesure de la distance entre un capteur et la surface en regard d'une pièce métallique à mesurer ou à vérifier dimensionnellement, est caractérisé par ce fait qu'à la pièce métallique est associée une pièce gabarit ou éta-
- 30 lon ayant une surface de référence en regard de la pièce à vérifier, un bras étant monté à mobilité relative dans l'intervalle entre la pièce et la surface de référence et dont chacune de ses extrémités porte un capteur à effet capacitif coopérant respectivement avec la surface de la pièce à mesurer ou
- 35 vérifier et avec la surface de référence, les valeurs de capacité relevées étant mises à profit pour la mesure et/ou la vérification.
- L'intervention de deux valeurs de capacité minimise et même annule les erreurs qui proviendraient de l'incertitude
- 40 sur la position relative de la pièce à mesurer et de la pièce

de référence et aussi de l'imperfection inévitable du montage mécanique prévu pour le déplacement du bras.

Selon une forme de réalisation, l'invention prévoit que les capteurs font partie d'une boucle d'asservissement propre à déplacer le bras suivant sa direction longitudinale pour que le capteur coopérant avec la pièce à mesurer reste à distance constante de celle-ci, l'information recherchée étant tirée de la mesure de la distance entre l'autre extrémité du bras et la surface de référence.

L'invention vise une forme de réalisation selon laquelle le capteur ou électrode coopérant avec la pièce est d'aire relativement petite, au bénéfice d'une exploration détaillée de la surface de la pièce et au contraire le capteur ou l'électrode de l'autre extrémité du bras est d'aire relativement grande, au bénéfice d'une sensibilité élevée et aussi d'une minimisation des défauts locaux éventuels de la surface de référence.

Le cas échéant, et si une précision particulièrement élevée est requise, l'invention prévoit une détermination préalable desdits défauts locaux, de la surface de référence par exemple par mesure optique interférométrique, de manière qu'il soit tenu compte de ceux-ci lors de la mesure ou la vérification d'une pièce.

L'invention vise aussi une variante, utilisable dans le cas de la vérification ou de la mesure d'une pièce non conductrice, et selon laquelle le capteur coopérant avec la pièce est non capacitif mais coopère avec la pièce par contact direct, la distance entre cette extrémité du bras et la pièce étant ainsi nulle, et la mesure ou vérification étant effectuée par la détermination de la distance entre l'autre extrémité du bras et la surface de référence qui est, elle, tirée de l'effet capacitif.

L'invention s'applique principalement à la vérification de pièces cylindriques, soit de la surface externe d'une telle pièce dans le cas de tiges ou d'aiguilles soit, dans le cas de tubes, de la surface interne d'un tube ou de sa surface externe ou bien de sa surface externe et de sa surface interne.

Elle n'exclut pas la vérification de pièces planes, la comparaison se faisant alors par rapport à la surface plane de référence que présente un "marbre".

Par la mise en oeuvre de l'invention, la pièce n'est soumise à aucun effort mécanique et il en est de même de la pièce-étalon.

5 Dans la description qui suit, faite à titre d'exemple, on se réfère aux dessins annexés, dans lesquels :

la figure 1 est un schéma de principe d'un appareil selon l'invention ;

la figure 2 est un autre schéma , à plus grande échelle;

la figure 3 montre un bras avec deux capteurs ;

10 les figures 4 et 5 sont des schémas explicatifs ;

la figure 6 montre un capteur de mesure ;

la figure 7 est un schéma explicatif du fonctionnement du capteur représenté sur la figure 6 ;

la figure 8 montre un capteur et une chaîne capacitive;

15 la figure 9 est un schéma d'ensemble d'un appareil selon l'invention ;

la figure 10 montre une variante de réalisation de l'appareil représenté sur la figure 9 ;

20 la figure 11 montre un appareil muni du capteur représenté sur la figure 8 ;

la figure 12 montre un appareil muni d'un dispositif de correction d'erreur binormale ;

la figure 13 est une vue en perspective d'un appareil selon l'invention ;

25 la figure 14 est une vue en coupe, à plus grande échelle, d'une partie de l'appareil de la figure 13 ;

la figure 15 montre une table de translation portée par des lames élastiques ;

30 la figure 16 est un schéma d'un appareil selon l'invention avec les circuits de mesure ;

la figure 17 montre un tracé caractéristique d'une pièce en cours de mesure ou de vérification.

35 Une pièce 21 (figure 1), par exemple une tige, dont la circularité d'une section droite au moins est à vérifier ou à mesurer, est placée à l'intérieur d'une pièce étalon ou gabarit dont la surface de référence 22, cylindrique, a une section 23 en principe rigoureusement circulaire en regard de la section 24 à vérifier de la pièce 21. Sur la figure, la non-circularité de la section droite de la pièce 21 a été exagérée.

40 Dans l'intervalle annulaire 25 entre la pièce 21 et la pièce

étalon 26 est disposé un bras 27 monté à rotation autour d'un axe 28, sensiblement confondu avec celui de la surface de référence 22.

Le bras 27 porte à une extrémité un capteur 29 qui coopère avec la surface 24 de la pièce 21 et à son autre extrémité un capteur 31 qui coopère avec la surface interne 22 de la pièce 26. Du capteur 29 dépendent des moyens pour maintenir le bras 27 à une distance constante de la surface de la pièce 21. Sur la figure on a montré l'extrémité 29 en contact avec la surface 24, mais il n'en est pas nécessairement ainsi. Du capteur 31 dépendent des moyens pour mesurer à tout instant la distance entre ledit capteur et le point d'intersection de la droite reliant les capteurs 29 et 31 avec la surface de référence 22. Sur la figure, on a montré le capteur 31 en contact avec la surface de référence 22 mais en réalité le capteur 31, quoique proche de la surface 22, n'est pas en contact avec celle-ci.

Si :

D est le diamètre de la surface de référence,

b la longueur du bras 27, c'est-à-dire la distance entre ses extrémités 29 et 31,

da_1 la distance constante entre le capteur et la surface 24,

dm_2 la distance mesurée par le capteur 31,

pour tout angle ϑ que fait le bras 27 avec une direction d'origine des angles, le rayon polaire $\rho(\vartheta)$ (fig.2) décrivant le contour de la pièce 21 à partir du centre 0 de la pièce de référence 22 est donné par la formule :

$$\frac{D}{2} = \rho(\vartheta) + da_1 + b + dm_2(\vartheta) \quad (1)$$

et si l'on appelle

$$R = \frac{D}{2} - da_1 - b \quad (2)$$

on a :

$$\rho(\vartheta) = R - dm_2(\vartheta) \quad (3)$$

La constante R est connue par un étalonnage préalable.

La mesure de $dm_2(\vartheta)$ donne directement la description du contour de la pièce à partir du centre de la surface de référence, qui est également un point fixe par rapport à la pièce.

Le résultat est indépendant de la qualité de la rotation

du bras ainsi que de la position de la pièce par rapport au centre 0.

Si une précision particulièrement élevée est souhaitée, on relève les défauts de forme de la pièce de référence ou
5 bague par un étalonnage préalable, et on a alors :

$$\rho(\vartheta) = R(\vartheta) - \underline{dm}_2(\vartheta) \quad (4)$$

$R(\vartheta)$ étant connu par ledit étalonnage.

Dans le cas où le gain de l'asservissement n'est pas infini, et si nécessaire, on fait intervenir, pour corriger
10 l'erreur d'asservissement, la mesure \underline{dm}_1 qu'effectue le capteur 29 et qui est très proche de \underline{da}_1 .

Aucune force mécanique n'est appliquée à la bague ni à la pièce.

La bague 26 et la pièce 21 sont rigoureusement immobiles
15 l'une par rapport à l'autre pendant la durée de la mesure ou de la vérification.

Dans le cas de l'utilisation de capteurs capacitifs, il n'y a pas de contact entre les capteurs et les pièces et les capteurs sont associés à des chaînes de mesure de capacité.

2P Pour une telle réalisation, le bras asservi 27 (fig.3) porte à une extrémité une armature ou électrode d'asservissement 33 de très petite dimension et l'asservissement en position du bras 27 est choisi pour que le capteur 33 reste à une distance optimale de la pièce 21. Le capteur de mesure ou électrode
25 de 34 est au contraire de très grande surface. La grande surface de l'électrode 34 permet l'intégration des défauts locaux de la surface de référence 22 de la pièce 26. Le rapport élevé entre la surface de l'électrode 34 et celle de l'électrode 33 fournit une amplification. Dans le cas d'une pièce à mesurer dont on
30 prévoit un écart très faible par rapport à la configuration nominale, on tire parti de cette amplification pour l'obtention d'une grande sensibilité. Dans le cas d'un écart important on tire parti de cette amplification pour l'obtention d'une grande étendue de mesure.

35 On rappelle maintenant, en référence à la figure 4, quelles sont les erreurs considérées habituellement dans la mesure dimensionnelle de la section droite d'un corps "cylindrique" C par un plan P, l'analyse ayant lieu par rapport à un point fixe 0 dudit plan. L'axe du corps C coupe ledit plan en
40 un point 0' différent du point 0. Le rayon de mesure RM passant

par O' rencontre le cylindre C au point M' qui se projette en M'' sur le plan P. La mesure radiale s'effectue comme montré en RM dans la direction faisant un angle θ par rapport à une référence angulaire RA.

5 Dans le plan P, le vecteur OO' se décompose en un vecteur δ_n (fig. 5) sur la direction OM et en un vecteur δ_t sur la direction perpendiculaire. Le premier vecteur δ_n est représentatif de l'erreur radiale ou normale et le vecteur δ_t est représentatif de l'erreur tangentielle. M''M' est la com-
10 posante d'erreur perpendiculaire au plan d'analyse et connue sous le nom d'erreur binormale.

Du fait que, selon l'invention, les capteurs coopérant respectivement avec la pièce à mesurer et avec la pièce de référence, sont portés par un même bras, l'erreur radiale est
15 automatiquement annulée.

La figure 6 montre une réalisation d'un capteur de mesure propre à éliminer l'erreur tangentielle. Le capteur de mesure 34, porté par le bras 27 comprend, outre l'électrode de mesure 35, deux petites électrodes 36, 37, encadrant l'électro-
20 de de mesure 35 et perpendiculaires au plan d'analyse. Ces petites électrodes sont montées pour l'application d'une méthode de zéro. La différence entre les mesures des deux électrodes répond à la formule ci-après :

$$\Delta_{mec} = \Delta t \times f [\underline{dm}(\theta)] \quad (5)$$

25 dans laquelle :

Δ_{mec} est la différence entre les mesures \underline{d} et \underline{d}' des deux électrodes,

Δt est la distance entre un rayon passant par O et un rayon passant par O' (fig. 7) ;

30 f est le signe d'une fonction ;

$\underline{dm}(\theta)$ est la distance mesurée à l'angle θ à partir d'une origine angulaire.

Pour éliminer l'erreur tangentielle, on peut soit asservir le bras 27 pour maintenir Δ_{mec} à la valeur zéro, en utilisant la tension de déséquilibre à la sortie de la chaîne capacitive 32 pour commander le déplacement tangentiel du bras 27,
35 les capteurs 36 et 37 étant montés en différentiel à l'entrée de la chaîne capacitive 32 comme montré sur le schéma de la figure 8, soit en introduisant la correction dans un calculateur
40 d'acquisition de données.

L'erreur binormale peut, de même, être corrigée par de petites électrodes compensatrices 41,42 placées sur le capteur 34 et perpendiculaires aux électrodes 36 et 37.

On se réfère maintenant à la figure 9.

5 Une table 51 est montée à rotation autour d'un axe 52 sur un bâti 53. Sur la table 51 est montée une seconde table 54, ou table de translation, pouvant se déplacer dans un sens et dans l'autre comme montré par la double flèche 55, perpendiculaire à l'axe 52. La table de translation porte sur un montant
10 56 un premier capteur 57 et sur un montant 58 un second capteur 59. Le capteur 57 est propre à coopérer avec une pièce 61 dont le contour externe 62 est à vérifier ou à mesurer. Le capteur 59 coopère avec la surface interne 63 d'une bague étalon 64 portée par le bâti 53. Le diamètre interne de la bague étalon est rela-
15 tivement grand par rapport au diamètre à mesurer ou à vérifier. Par exemple, pour des pièces de diamètre extérieur compris entre 6 mm et 40 mm on peut utiliser une bague étalon de diamètre intérieur égal à 200 mm.

Une même bague étalon peut ainsi être utilisée pour la
20 vérification ou la mesure de pièces de diamètres différents.

Dans la réalisation selon la figure 10, analogue à la forme de réalisation précédente, le montant 64 porte un capteur 65 dirigé à l'éloignement par rapport à l'axe 52, ce qui permet l'analyse de la surface intérieure 66 d'une pièce tubulaire à
25 mesurer 67.

Dans la forme de réalisation montrée sur la figure 11, le bras porte-capteurs 71 porte à son extrémité externe un capteur 34 comprenant une électrode principale 35 flanquée de deux électrodes auxiliaires 36 et 37, comme montré en référence à la
30 figure 8. Le bras 71 est porté par une table de translation 72 avec interposition de cales 73 et 74 en matériau piézo-électrique. Les capteurs 36 et 37 étant montés en méthode de zéro, les cales 73 et 74 sont asservies par la tension de déséquilibre afin d'amener par translation tangentielle l'axe 75 du
35 bras 71 à passer constamment par le centre de la bague de référence 64. Le capteur 57, à l'autre extrémité du bras 71, coopère avec la pièce 61.

Dans la forme de réalisation montrée sur la figure 12, un dispositif de correction de l'erreur binormale est prévu.
40 Le bras porte-capteurs 71 est porté par la table de transla-

tion 76 présentant à une extrémité un appendice 77 sur lequel repose le bras 71 par l'intermédiaire d'un pivot 78 proche de l'extrémité portant le capteur 57. A son autre extrémité, le bras 71 repose sur le bras 76 par l'intermédiaire d'un barreau 79 en matériau piézo-électrique. Les capteurs 41 et 42 sont montés en méthode de zéro et leur tension de déséquilibre asservit la cale que constitue le barreau 79 pour maintenir le bras 71 perpendiculaire à l'axe de la bague de référence 64.

Avec des chaînes capacitives liées aux capteurs ayant une bande passante de 1 Hertz dont le bruit thermodynamique se traduit par une incertitude en valeur quadratique moyenne de 10^{-7} pf, la résolution obtenue sur le capteur de référence est supérieure à 10^{-4} μ m.

La limite de l'appareil est alors donnée par celle du second capteur, à savoir celui utilisé pour le palpé de la pièce.

Dans le cas d'un capteur capacitif d'un diamètre de 1mm et situé à 1mm de la pièce, la résolution est d'environ $5 \cdot 10^{-4}$ μ m.

Le capteur capacitif coopérant avec la référence avait un diamètre de 7,5 mm.

On se réfère maintenant à la figure 13.

Le bâti 101 de l'appareil dépend d'une embase 102 sur laquelle sont érigées des colonnes 103 et 104 reliées à leur partie supérieure par une traverse 105. Sur un plateau 106 solidaire du bâti 101 repose, montée à rotation autour d'un axe vertical, la table de rotation 107 entraînée en rotation par un moteur pas à pas 108 à commande numérique porté par le plateau 106. A la table 106 est associé un codeur angulaire de précision. La table de translation 109 est supportée par la table de rotation 107 par l'intermédiaire de lames élastiques identiques entre elles 111, 112, 113 et 114 interposées entre les angles de la table 109 et les angles d'une plaque rectangulaire 115 solidaire de la table de rotation 107. De la table 109 dépend, vers le bas, une patte 116 (fig. 14) portant une bobine 117 propre à coopérer avec un circuit magnétique 119, à section verticale en forme de E, porté par la plaque 115 solidaire de la table de rotation 107. La bobine 117 et le circuit 119 constituent un moteur électromagnétique commandant, sous l'action du courant qui traverse la bobine 117, un déplacement qui laisse la table 109 rigoureusement parallèle à son support 121.

Dans la forme de réalisation selon la figure 15, la table de translation 122 est portée par des lames élastiques 123, encastrées dans les angles de la table 122 et à leurs autres extrémités, et sur une contre-platine 124. La contre-platine 124 est suspendue, par des lames 125 identiques tant en dimensions qu'en raideur aux lames 122, par un support 126, encadrant la table 122. On a montré en trait plein la position de la contre-platine, de la table et des lames pour une condition non sollicitée des lames 125. Sous l'effet du moteur prévu pour le déplacement de la table 122, par exemple du moteur électromagnétique montré sur la figure 14, la contre-platine 124 et la table 122 prennent des positions montrées en trait pointillé. Alors que la contre-platine 124 s'est légèrement rapprochée du support 126, du fait de l'inflexion des lames 125, la table 122 s'est rapprochée de la même quantité de la contre-platine 124, sous l'effet de l'inflexion identique des lames 123, de sorte que le déplacement latéral de la table ne s'accompagne d'aucun déplacement dans le sens vertical. Le déplacement de la table 122 est alors rigoureusement un déplacement en translation.

Sur la table 122 (fig. 13) est fixé le bras porte-capteurs 131 qui porte sur un retour d'extrémité 132 un capteur 133 coopérant avec la surface interne 134 de la bague de référence 135. Sur un bossage 136 du bras 131 est fixé un capteur 137 propre à coopérer avec la pièce 138 à mesurer ou à vérifier. Celle-ci est portée par une pince 139, pneumatique ou mécanique, dépendant d'un plateau 141 déplaçable manuellement le long d'une tige 142. Le plateau 141 est solidaire d'un plateau 143, déplaçable manuellement le long d'une tige 144 perpendiculaire à la tige 142. Le plateau 143 est porté par une table de translation verticale 145 pouvant être déplacée vers le haut ou vers le bas par un moteur 146.

Du capteur 137 coopérant avec la pièce 138 est issu (fig. 16) un circuit 151 aboutissant à une première entrée 152 d'une chaîne capacitive 153 dont la seconde entrée 154 reçoit également une information en provenance d'un condensateur de référence 155. La chaîne capacitive 153 est suivie par un réseau correcteur 156 suivi lui-même par un premier amplificateur 157 dont la sortie 158 commande le moteur 159 pour la commande de la table de translation 131, l'ensemble formant une boucle d'asservissement 161.

Du capteur 133 est issu un circuit 162 aboutissant à la

première entrée 163 d'une seconde chaîne capacitive 164 dont la seconde entrée 165 forme la sortie d'un dispositif 166 fournissant une information dépendant du condensateur de référence. La sortie 167 de la chaîne capacitive 164 aboutit à
5 un dispositif comprenant un voltmètre de grande précision, des moyens d'affichage et des moyens de conversion analogique numérique. La sortie 169 du dispositif 168 est appliquée à un calculateur numérique 171 dont une sortie 172 est reliée par un circuit 173 à un dispositif 174 pour la commande du moteur
10 de rotation 108 laquelle s'effectue par l'intermédiaire du circuit 175. Le circuit 173 assure également par un dispositif 176 la commande du moteur de translation verticale 146, par l'intermédiaire d'un circuit 177.

Une seconde sortie 178 du calculateur numérique 171
15 permet directement, sur une table traçante 179, l'obtention de tracés caractéristiques de la pièce en cours de mesure ou de vérification. Un tel tracé est montré par la courbe T sur la figure 17. La courbe intérieure T' est obtenue par "effet de loupe". L'angle rentrant visible sur cette courbe amplifie la
20 légère diminution de diamètre visible sur la courbe T de la figure dans la même zone angulaire. L'échelle de la courbe T' est vingt fois plus grande que celle correspondant à la courbe T.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour la mesure et la vérification de précision de pièces mécaniques, notamment de révolution, comme des pièces cylindriques, par application de l'effet capacitif entre une pièce métallique et au moins un capteur capacitif, caractérisé en ce qu'on effectue une comparaison point par point entre la pièce mécanique et une pièce de référence par mesures de distances dont l'une au moins fait appel à l'effet capacitif.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la comparaison est conduite en faisant appel à l'effet capacitif avec la pièce de référence.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'elle est conduite en faisant appel également à l'effet capacitif avec la pièce à mesurer.
4. Appareil pour la mise en oeuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 3.
5. Appareil selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il comprend un bras porteur de l'un et l'autre des capteurs.
6. Appareil selon la revendication 5, caractérisé en ce que le bras est monté à rotation.
7. Appareil selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'axe de rotation du bras est l'axe de la pièce de référence.
8. Appareil selon la revendication 5, caractérisé en ce que les informations des deux capteurs sont appliquées pour maintenir le bras dans une position où l'un des capteurs qu'il porte reste à distance constante de la pièce avec laquelle il coopère.
9. Appareil selon la revendication 8, caractérisé en ce que le bras est asservi en position pour que son capteur coopérant avec la pièce à mesurer reste à distance constante de la surface de ladite pièce.
10. Appareil selon la revendication 5, caractérisé en ce que le bras est porté par une table de translation.
11. Appareil selon la revendication 10, caractérisé en ce que la table de translation est portée par une table montée à rotation autour de l'axe de pivotement du bras.
12. Appareil selon la revendication 11, caractérisé en ce que la table de translation est portée par la table de rotation par l'intermédiaire de lames élastiques.

13. Appareil selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'une contre-platine est prévue entre la table de rotation et la table de translation pour maintenir constant le niveau de cette dernière.

5 14. Appareil selon la revendication 8, caractérisé en ce que la surface du capteur coopérant avec la surface de référence est plus grande que la surface coopérant avec la surface à mesurer.

10 15. Appareil selon la revendication 14, caractérisé en ce que le rapport de surface est de l'ordre de 10 à 1.

16. Appareil selon la revendication 14, caractérisé en ce que le capteur à grande surface comporte une électrode principale et des électrodes de correction.

15 17. Appareil selon la revendication 16, caractérisé en ce que les électrodes de correction comprennent un couple d'électrodes pour la correction tangentielle.

18. Appareil selon la revendication 16, caractérisé en ce que les électrodes de correction comprennent un couple d'électrodes pour la correction binormale.

20 19. Appareil selon la revendication 8, caractérisé en ce que le capteur coopérant avec la pièce à mesurer est monté de manière amovible.

25 20. Appareil selon la revendication 19, caractérisé en ce que le capteur coopérant avec la pièce à mesurer peut être à volonté dirigé vers l'axe ou la périphérie.

21. Appareil selon la revendication 10, caractérisé en ce que le bras porte-capteurs est porté par la table de translation avec interposition d'au moins une cale piezo-électrique.

30 22. Appareil selon la revendication 21, caractérisé en ce qu'au moins une cale piezo-électrique est influencée à partir des informations tirées des électrodes de correction de l'erreur tangentielle.

35 23. Appareil selon la revendication 11, caractérisé en ce que le bras porte-capteurs est monté à bascule sur la table de translation pour un mouvement de correction sous l'influence des électrodes auxiliaires de correction de l'erreur binormale.

Fig. 1

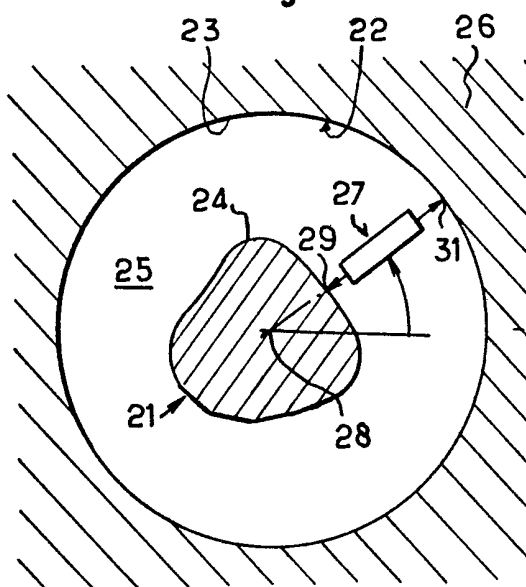


Fig. 2

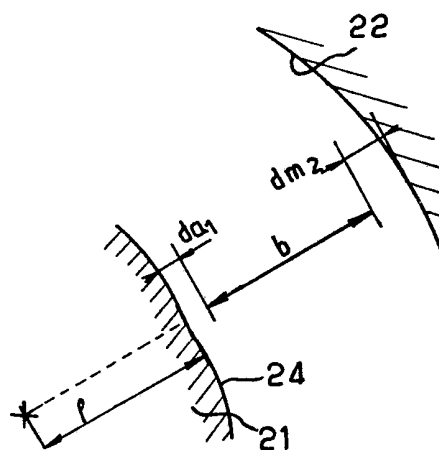


Fig. 3

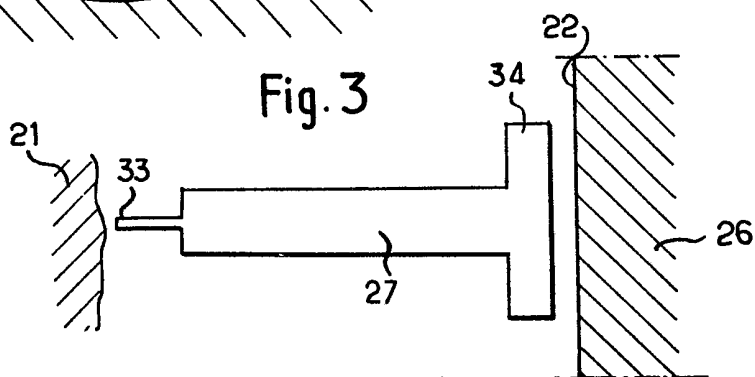


Fig. 4

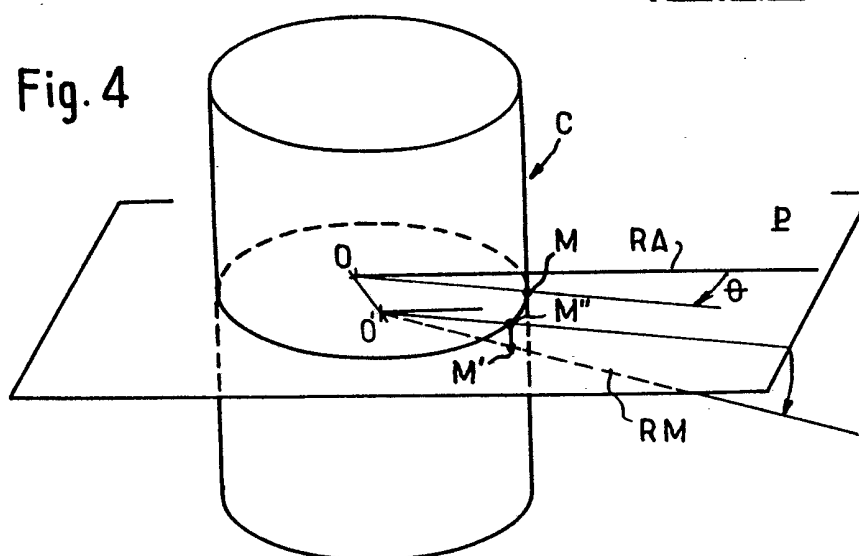


Fig. 5

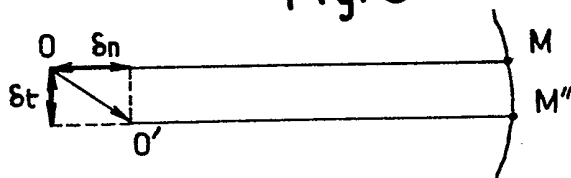


Fig. 6

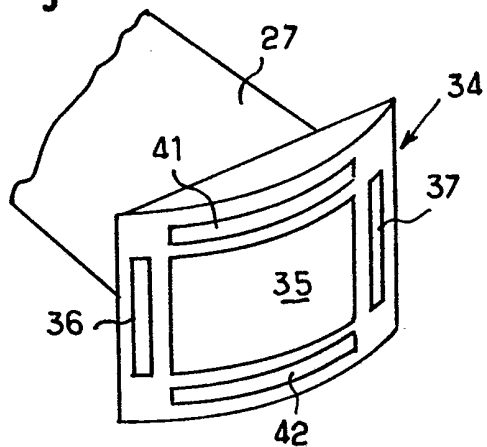


Fig. 7

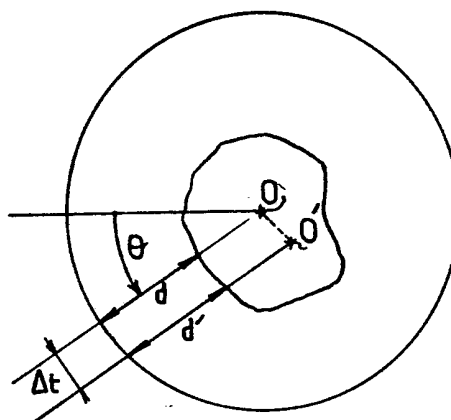


Fig. 8

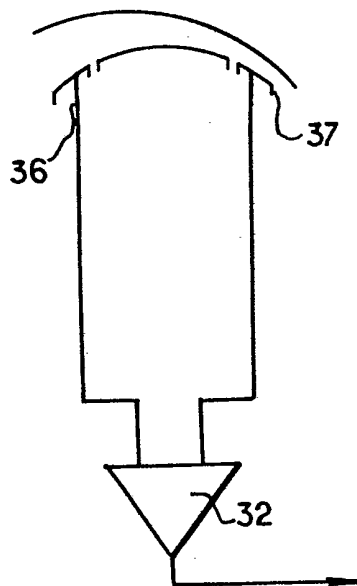


Fig. 9

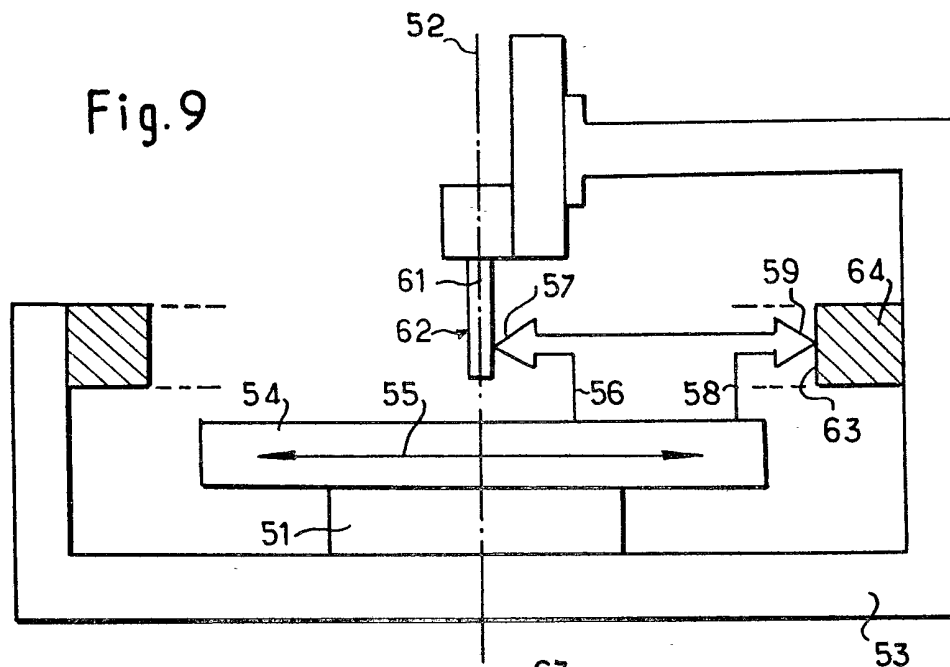


Fig. 10

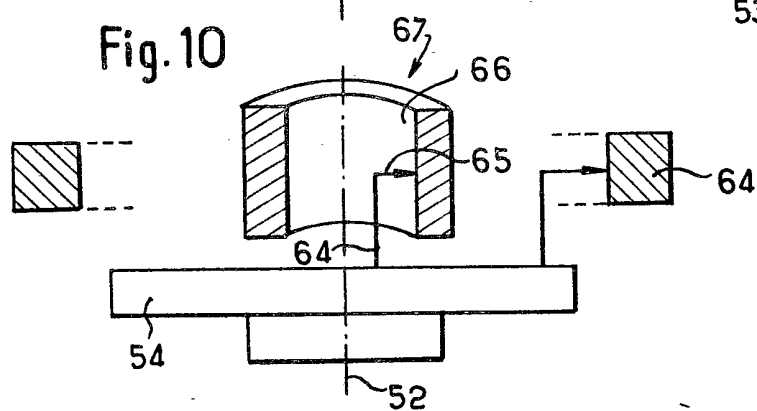


Fig. 11

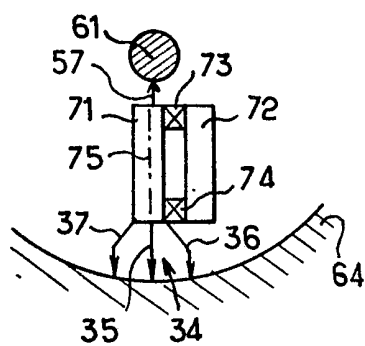


Fig. 12

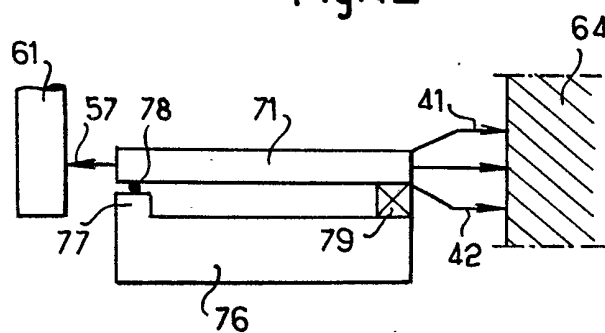


Fig. 13

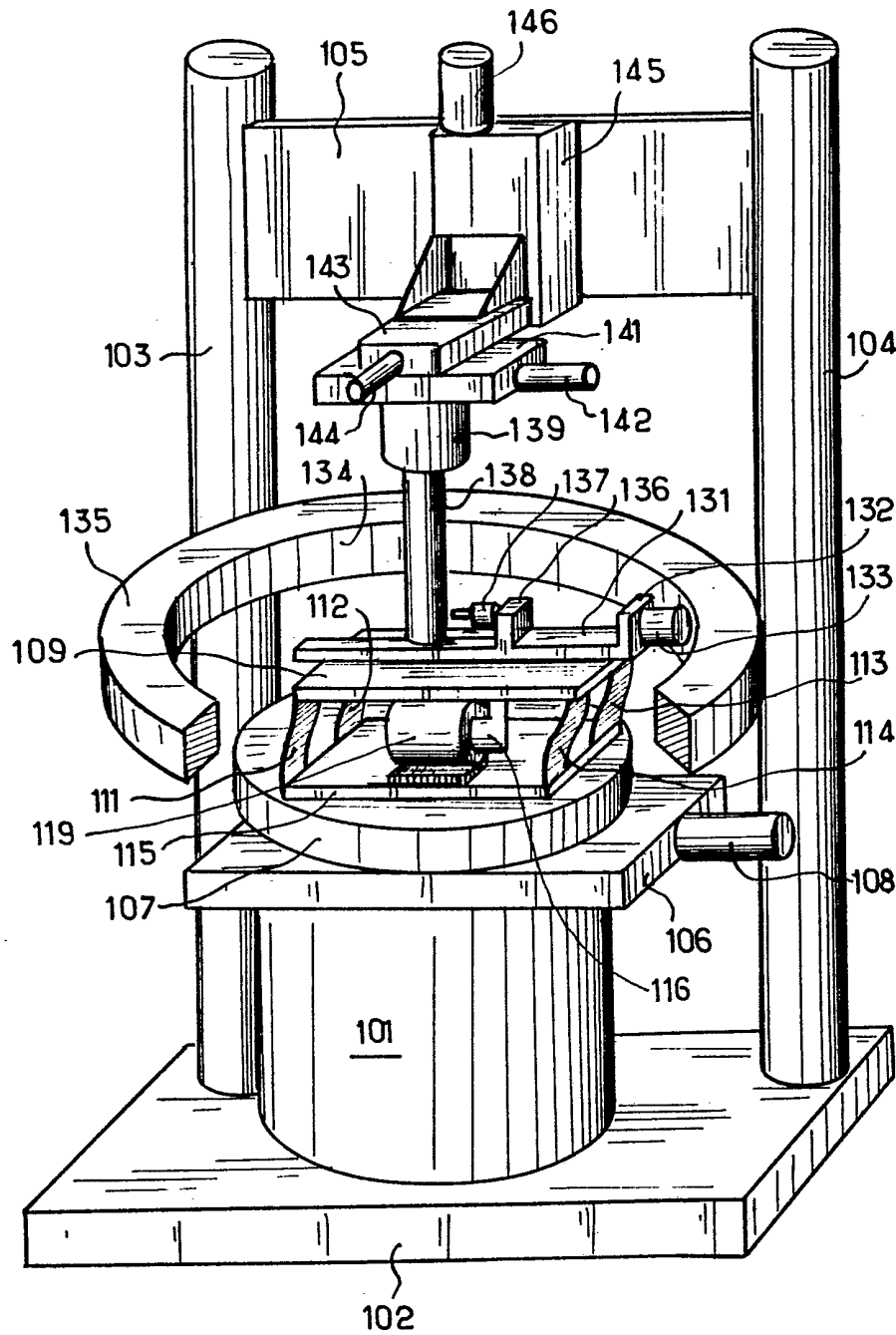


Fig. 14

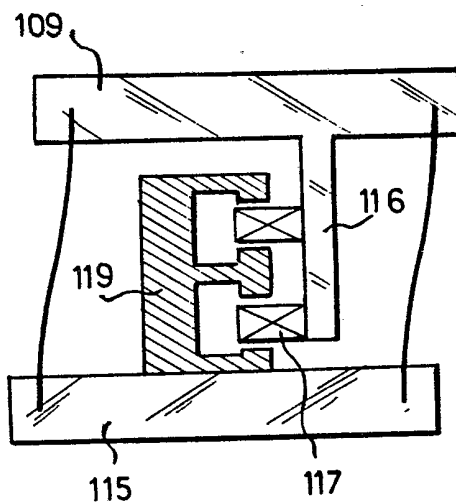
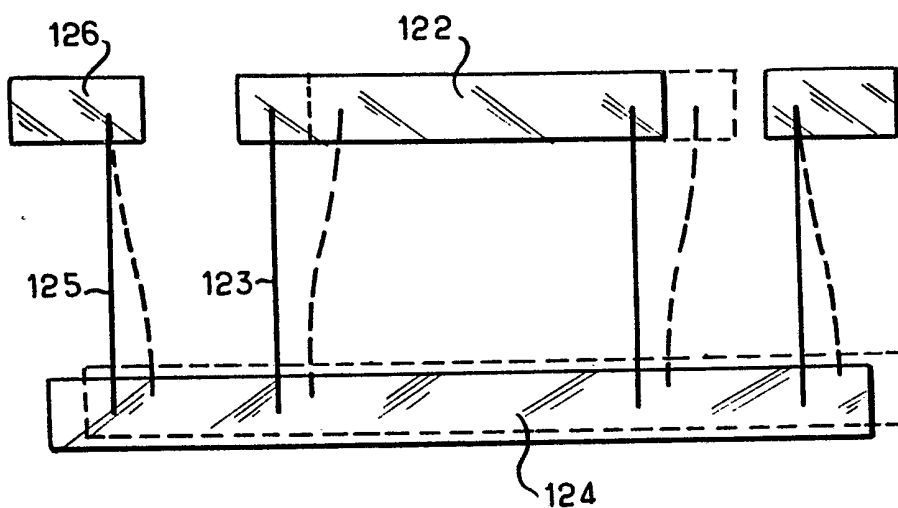


Fig. 15



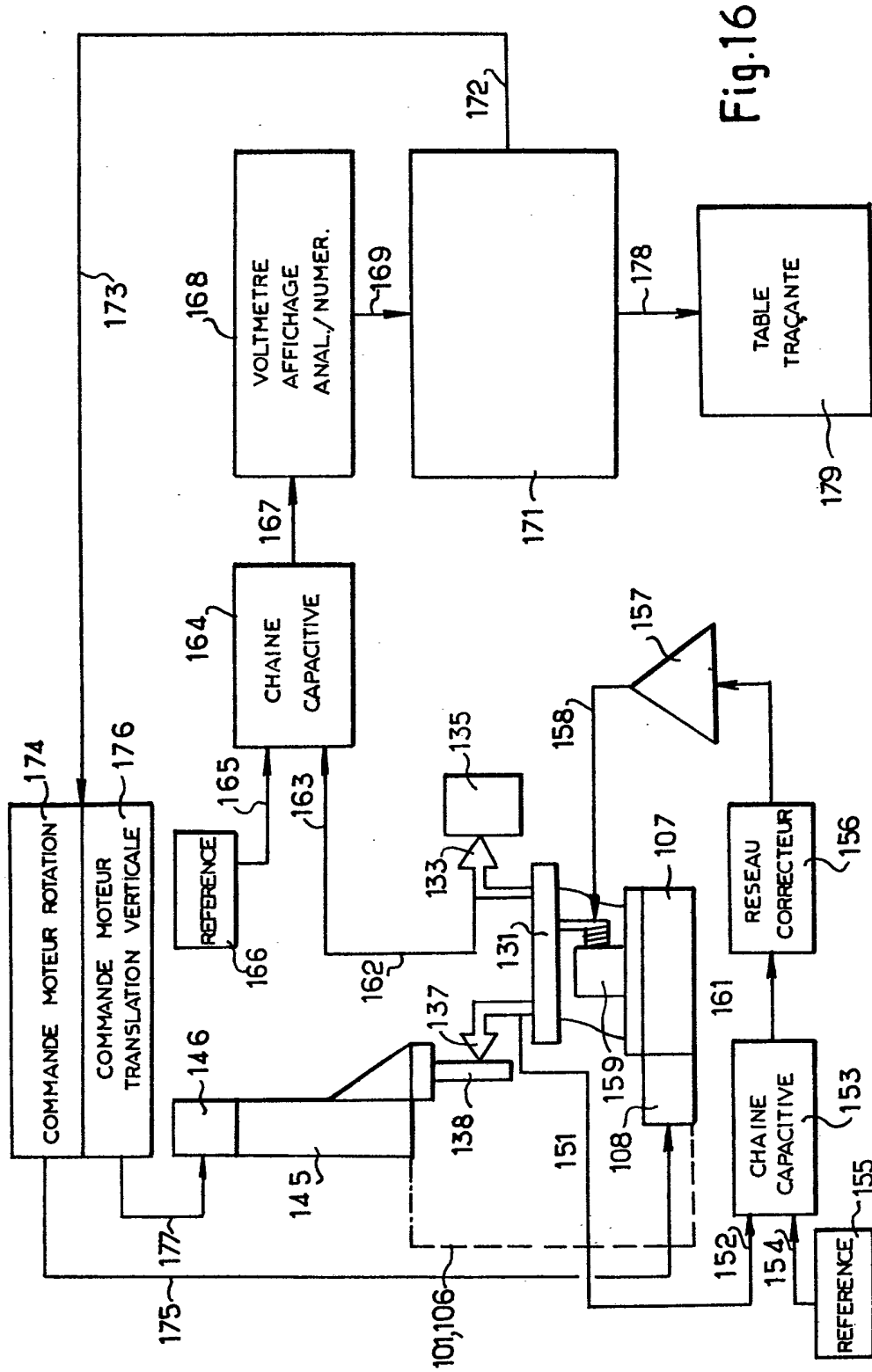


Fig.16

Fig. 17

