

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) Numéro de publication: **0 550 300 B1**

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(49) Date de publication de fascicule du brevet: **08.03.95** (51) Int. Cl.⁶: **G01B 11/24**

(21) Numéro de dépôt: **92403280.8**

(22) Date de dépôt: **04.12.92**

(54) **Capteur optique compact et à haute résolution pour l'analyse de formes tridimensionnelles.**

(30) Priorité: **30.12.91 FR 9116305**

(43) Date de publication de la demande:
07.07.93 Bulletin 93/27

(45) Mention de la délivrance du brevet:
08.03.95 Bulletin 95/10

(84) Etats contractants désignés:
BE DE DK ES GB GR IE IT LU NL PT

(56) Documents cités:
WO-A-90/09561
FR-A- 2 627 047

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 9, no.
221 (P-386)(1944) 7 Septembre 1985 & JP-
A-60 079204

(73) Titulaire: **SA KREON INDUSTRIE**
Rue Nicolas Appert
F-87021 Limoges (FR)

(72) Inventeur: **Cosnard, Eric**
Barbe d'Or, 4107
F-31180 La Peyrouse-Fossat (FR)
Inventeur: **Steuperaert, Jan**
Les régourdes
F-31460 Le Faget (FR)

(74) Mandataire: **Rodhain, Claude et al**
Cabinet Claude Rodhain S.A.
3, rue Moncey
F-75009 Paris (FR)

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen, toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition (art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

L'invention concerne l'acquisition et la numérisation en trois dimensions de la forme de pièces gauches quelconques au moyen de systèmes comportant un capteur optique avec une source de rayonnement laser et une ou plusieurs caméras analysant la trace formée par le faisceau laser sur l'objet à étudier.

Une telle technique est décrite en détail, notamment dans les FR-A-2 627 047, FR-A-2 642 833 et FR-A-2 629 198, qui appartiennent à la Demanderesse.

Plus précisément, cette technique prévoit d'engendrer un « plan laser », c'est-à-dire un faisceau lamellaire sectoriel de très faible épaisseur, mais dont la largeur lui permet de couvrir la totalité de l'objet à analyser, avec une ou deux caméras regardant ce plan sous deux incidences différentes. L'ensemble est placé à l'extrémité d'un bras manipulateur mobile, par exemple celui d'une machine-outil à commande numérique, afin de réaliser un balayage de la pièce par le plan laser et permettre ainsi l'acquisition progressive, dans les trois dimensions, de la surface de la pièce. Le balayage peut être réalisé aussi bien par pivotement que par translation du capteur par rapport à la pièce ; par ailleurs, le mouvement de balayage peut être obtenu également en maintenant le capteur fixe et en déplaçant la pièce par rapport à ce dernier, la pièce étant dans ce cas par exemple montée sur une table à mouvements croisés télécommandée.

Jusqu'à présent, les capteurs utilisés pour mettre en oeuvre cette technique étaient relativement encombrants, fragiles et complexes.

L'un des buts de l'invention est de proposer une structure de capteur qui permette de miniaturiser celui-ci dans des proportions importantes, tout en conservant et même en accroissant sa précision et sa résolution (la « résolution » étant la taille du pixel propre au système et la « précision » étant celle que l'on obtient en tenant compte des étapes de numérisation et de reconstitution ; la précision de position, peut être, comme on le verra, meilleure que le pixel compte tenu des divers traitements effectués lors de l'étape d'analyse de la trace laser).

L'intérêt d'un capteur miniaturisé, outre la commodité qu'il procure, est de permettre son utilisation même dans un espace très réduit, pour des pièces de petites dimensions, des surfaces peu accessibles, etc., c'est-à-dire chaque fois que l'on veut une grande précision dans un champ réduit.

Mais dans ce cas le capteur va se trouver beaucoup plus près de la pièce à analyser, et il va alors se poser un certain nombre de problèmes nouveaux, tout particulièrement celui de la profondeur de champ, qui va se dégrader d'autant plus que le capteur est rapproché de l'objet.

Actuellement, les capteurs à laser He-Ne sont réglés avec une focalisation à environ 1 m de la source, donc avec un recul important (qui, de toute façon, est indispensable compte tenu de l'encombrement relativement important du laser hélium-néon et des différents organes qui lui sont associés).

Ce recul important permet, grâce à une focalisation à longue distance de former une trace extrêmement fine avec une profondeur de champ importante, avec, typiquement, un faisceau lamellaire d'épaisseur inférieure à 0,2 mm sur une profondeur de champ de 100 mm.

En outre, le faisceau lamellaire étant obtenu par des moyens statiques (généralement une lentille cylindrique), l'étalement du faisceau, combiné au recul important, fait que la densité locale d'énergie est relativement faible (de l'ordre de $1 \mu\text{W}/\text{mm}^2$), ce qui rend le faisceau sans danger pour l'opérateur.

En revanche, si l'on peut miniaturiser le capteur (grâce notamment à l'intégration d'une diode laser en remplacement du laser He-Ne), et si l'on ne peut pas ou l'on ne veut pas reculer celui-ci par rapport à l'objet, va se poser le problème de la profondeur de champ en raison de la focalisation à une distance beaucoup plus courte (typiquement 10 cm au lieu de 1 m), avec une incidence corrélative sur la finesse de la trace, donc sur la résolution et sur la précision finale.

En outre, la densité énergétique, qui varie comme l'inverse de la distance, va augmenter dans des proportions très importantes, rendant dangereux le faisceau en cas de rencontre avec l'œil d'un opérateur au voisinage de l'objet.

Le but de l'invention est de conserver les avantages des capteurs actuels malgré la miniaturisation et le recul physique beaucoup plus faible par rapport à l'objet.

Essentiellement, l'invention consiste à créer un recul virtuel de la source à l'intérieur du capteur afin de se placer sensiblement dans les mêmes conditions que celles d'un faisceau à focalisation longue, compensant ainsi le faible recul physique imposé par la configuration de l'ensemble capteur-objet.

A cet effet, le capteur de l'invention, qui comporte, de manière en elle-même connue et décrite par exemple dans les trois brevets précités, une source laser produisant un faisceau plan lamellaire illuminant la surface d'un objet de manière à produire sur ce dernier une trace lumineuse incidente curviligne analysée par au moins une caméra vidéo produisant une information convertie en données numériques représentatives de coordonnées de pixels, est caractérisé par une boîte à lumière comprenant, dans un même boîtier

placé au-dessus de l'objet à analyser et à faible distance de celui-ci : ladite source laser, produisant un faisceau rectiligne collimaté ; des moyens optiques pour transformer ce faisceau rectiligne en un faisceau plan lamellaire ; et des moyens d'allongement du trajet optique du faisceau, comprenant deux miroirs plans fixes, disposés en vis-à-vis de manière à produire une pluralité de réflexions entre un point d'entrée et un point de sortie du faisceau. De cette manière, on compense le faible recul matériel entre le boîtier et l'objet par un recul optique virtuel et on accroît ainsi corrélativement la profondeur de champ de la région utile du faisceau plan lamellaire en sortie du boîtier.

Avantageusement, les points d'entrée et de sortie comprennent des moyens optiques de réglage d'incidence de faisceau, de manière à ajuster le nombre de réflexions entre les deux miroirs en vis-à-vis, et les moyens optiques pour transformer le faisceau rectiligne en un faisceau plan lamellaire sont des moyens statiques.

Ce capteur peut en particulier comprendre, en outre, au moins un bloc détecteur attenant à la boîte à lumière et pourvu d'un organe photoélectrique analyseur d'image et de moyens formant objectif, placés devant cet organe analyseur d'image.

Dans ce cas, selon un aspect avantageux de l'invention, il est en outre prévu des moyens de bascule relative de l'organe analyseur d'image par rapport aux moyens formant objectif.

Selon un autre aspect avantageux de l'invention, il est en outre prévu un circuit électronique d'extraction de l'information représentative de la position de la trace du faisceau laser sur chaque ligne d'image délivrée par l'organe analyseur d'image, ce circuit comprenant : un étage intégrateur, recevant en entrée un signal électrique représentatif de l'intensité lumineuse reçue, variant en fonction de la position considérée sur la ligne analysée, et délivrant en sortie un signal, croissant, représentatif de l'énergie lumineuse cumulée reçue ; un étage diviseur, recevant en entrée le signal d'énergie délivré par l'étage intégrateur ; un étage à retard, recevant en entrée le signal d'énergie délivré par l'étage intégrateur ; et un étage comparateur, recevant sur chacune de ses entrées les signaux de sortie respectifs de l'étage diviseur et de l'étage à retard, le basculement de cet étage comparateur définissant, au cours du balayage de la ligne d'image, la position du milieu de la trace du faisceau laser.

On va maintenant décrire un exemple de réalisation de l'invention, en référence aux dessins annexés.

La figure 1 est une vue frontale, en élévation, d'un capteur selon l'invention avec une boîte à lumière et deux détecteurs attenants, l'ensemble étant monté à l'extrémité d'un bras manipulateur mobile.

La figure 2 est une vue latérale, selon II-II de la figure 1, de ce même ensemble.

La figure 3 est une vue en coupe schématique de la boîte à lumière du capteur selon l'invention.

La figure 4 est une vue en perspective montrant les divers organes optiques de cette boîte à lumière.

La figure 5 est une vue en coupe schématique de l'un des détecteurs des capteurs de l'invention.

La figure 6 est une coupe schématique de l'ensemble objectif-dispositif analyseur du détecteur de la figure 5.

La figure 7 est un schéma montrant la manière dont les défauts de netteté et de profondeur de champ sont compensés par un système de bascule de l'organe photoélectrique du détecteur.

La figure 8 illustre la forme générale du signal vidéo d'une ligne de balayage en sortie de l'organe photoélectrique.

La figure 9 est le schéma électronique d'un circuit d'analyse de ce signal permettant l'extraction de l'information représentative de la position de la trace du faisceau laser.

La figure 10 est un chronogramme montrant divers signaux produits au sein du circuit de la figure 9.

Les figures 11 et 12 illustrent une variante numérique de mise en oeuvre du système d'analyse du signal, dont la figure 9 illustre une version analogique.

Sur la figure 1, on a représenté le capteur de l'invention, désigné de façon générale par la référence 1.

Ce capteur est situé à proximité d'une pièce à analyser 2 dont on cherche à acquérir et numériser la forme, gauche, de la surface. Le capteur 1 est monté à l'extrémité d'un bras manipulateur 3, par exemple celui d'une machine-outil à commande numérique, et il comporte un élément central 100, qui est une boîte à lumière émettant un faisceau laser 4 qui est un faisceau plan lamellaire, c'est-à-dire de faible épaisseur (cf. figure 1) mais de largeur importante (cf. figure 2). L'impact du faisceau avec la surface de la pièce produit une trace lumineuse curviligne 5, qui est analysée par un ou (de préférence) deux détecteurs 200 comportant chacun une caméra et des circuits électroniques de numérisation et d'analyse de l'image de la caméra. Ces deux détecteurs 200 sont avantageusement réalisés sous forme d'éléments attenants à la boîte à lumière 100 et disposés de part et d'autre de celle-ci, de manière à constituer un ensemble unique (le capteur 1) porté par le bras manipulateur 3. L'utilisation de deux caméras permet de réduire de façon importante le temps d'acquisition de la forme tridimensionnelle, mais n'est pas une caractéristique nécessaire de l'invention, le capteur pouvant ne comporter qu'une caméra.

Le capteur effectue un balayage de manière à acquérir la totalité de la forme de la pièce. Dans l'exemple illustré, ce balayage est un balayage en translation réalisé par déplacement du bras manipulateur 3 dans une direction (illustrée par la flèche 6) perpendiculaire au plan du faisceau lamellaire, typiquement avec une avance de 2 à 3 pas par seconde, chaque pas ayant une valeur de l'ordre de 0,1 à 0,5 mm selon la précision d'acquisition recherchée. La taille du pixel a une valeur brute typique de $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$, valeur pouvant être réduite par un traitement électronique de lissage à $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$.

On notera que, en variante, il est possible de réaliser le déplacement relatif capteur/pièce en déplaçant la pièce et en maintenant le capteur fixe, ou de prévoir un balayage par toute composition de translations et de rotations.

L'invention s'attache particulièrement à résoudre les problèmes optiques, notamment celui de la profondeur de champ, qui apparaissent lorsque le capteur est très proche de la pièce, c'est-à-dire lorsque le rapport d/x est élevé, d étant (figure 2) la profondeur du champ utile et x étant la distance minimale entre le capteur et l'objet. On verra en particulier que ce rapport d/x peut atteindre des valeurs largement supérieures à 1, contre des valeurs de l'ordre de 0,1 à 0,2 dans les techniques connues employées jusqu'à présent.

Les figures 3 et 4 montrent la structure de la boîte à lumière 100 (sur la figure 4, on a isolé les seuls éléments optiques contribuant à la formation du faisceau).

Cette boîte à lumière comporte essentiellement une source laser 110, par exemple une diode laser émettant dans le visible un faisceau fin collimaté, cylindrique, avec une puissance de l'ordre de 3 mW. Ce faisceau frappe une lentille cylindrique 120 transformant le faisceau cylindrique mince en un faisceau plat (voir figure 4). Il est prévu des moyens 111 pour ajuster en abscisse et en ordonnée la position exacte de la source laser 110 de manière à centrer parfaitement le spot lumineux au milieu de la lentille cylindrique 120. Cette dernière comporte, quant à elle, des moyens de réglage fin en rotation (de l'ordre de $\pm 5^\circ$ ou $\pm 10^\circ$) autour de son axe optique, afin de régler l'inclinaison du faisceau élargi (faisceau lamellaire) sur son axe.

Ce faisceau est envoyé, par l'intermédiaire d'un miroir de renvoi 130, vers un ensemble optique 140, caractéristique de l'invention, permettant d'allonger le trajet optique du faisceau, et que l'on va maintenant décrire en détail.

Cet ensemble 140 comporte tout d'abord un miroir ajustable 141 dirigeant le faisceau lamellaire produit par les éléments décrits précédemment vers un premier miroir 142 d'un ensemble de deux miroirs plans parallèles 142, 143. Par le phénomène bien connu des « glaces parallèles », il va se produire une pluralité de réflexions du faisceau, ce qui va allonger le trajet de celui-ci et, simultanément, accroître progressivement sa largeur, comme on peut le voir figure 4 (sur cette figure, le trait interrompu illustre le centre du faisceau lamellaire qui, pour des raisons de clarté de la figure, n'a été illustré qu'au début et à la fin de ses réflexions successives).

Après la dernière réflexion, le faisceau est capté par un miroir 144 qui le renvoie en direction d'une fenêtre 150 au sortir de laquelle il viendra frapper la pièce à analyser.

Le miroir ajustable 141 permet de régler le nombre de réflexions successives, en faisant varier l'angle de la première incidence du faisceau sur le miroir 142. Typiquement, on ajuste l'ensemble de manière à obtenir au moins quatre réflexions successives, ce nombre n'étant cependant en aucune façon limitatif.

Le miroir 144, quant à lui, permet d'ajuster la perpendicularité du faisceau en sortie de la boîte à lumière.

On notera incidemment que le faisceau lamellaire est généré de façon purement statique, sans aucun organe tel qu'un miroir mobile ou élément analogue, ce qui présente un grand nombre d'avantages : élimination du danger pour l'opérateur (l'énergie lumineuse étant étalée sur la largeur du faisceau au lieu d'être concentrée sur un spot mobile intense), absence d'organe mécanique fragile, pas de synchronisation à prévoir, grande précision (absence de vibrations, de dérèglages, etc.).

Bien entendu, tous les miroirs utilisés dans cette boîte à lumière sont des miroirs rectifiés de qualité optique, et la boîte à lumière est hermétiquement close, de façon à empêcher toute passage de poussières ou de fumées dans le trajet du faisceau.

Dans un exemple de réalisation effectivement mise en œuvre, la boîte à lumière a des dimensions $l \times h \times L$ de $70 \times 85 \times 140$ et produit, à une distance $x = 100$ mm de la pièce, un champ laser s'étendant sur $d = 150$ mm (avec les conventions de la figure 2). Le champ trapézoïdal 7 de la figure 2 a alors un petit côté de 65 mm et un grand côté de 95 mm. L'allongement du trajet optique permet d'avoir un recul virtuel de l'ordre de 1 m, distance à laquelle on règle la focalisation du faisceau laser. Le point exact de focalisation est situé environ au tiers inférieur du champ trapézoïdal, de façon à avoir approximativement la même épaisseur de faisceau en début et en fin de champ. On obtient ainsi, en début et en fin de champ, une épaisseur de faisceau de l'ordre de 0,3 mm, cette épaisseur descendant à 0,2 mm au point de focalisation : la profondeur de champ est donc excellente malgré le très faible recul physique du capteur et la très

grande étendue du champ laser.

On va maintenant décrire la partie détecteur du capteur.

La figure 5 montre, de façon schématique, la structure interne de chacun des deux détecteurs 200, qui comportent une glace d'entrée 210 située en vision directe de la trace laser formée par la rencontre du faisceau avec la pièce. L'image de cette trace est renvoyée, par un jeu de miroirs 221, 222 vers un bloc analyseur 230 transformant l'image en un signal électronique numérisé et traité par un ensemble de circuits désignés par la référence générale 240 avant d'être envoyé, via une liaison 250 vers un système informatique de traitement et de reconstitution de l'image. Chacun des détecteurs a par exemple des dimensions $h \times L \times l$ de 100 x 100 x 70.

Le bloc 230, représenté plus en détail figure 6, comporte essentiellement un objectif 231 avec une lentille, un diaphragme et un filtre appropriés, placé devant un organe photoélectrique analyseur d'image 232 tel qu'un DTC (Dispositif à Transfert de Charges). Le réglage de la mise au point se fait par déplacement en translation de l'objectif 231 à l'intérieur de son tube 233 (flèche 234).

Selon un aspect particulier de la présente invention, le DTC (ou autre analyseur d'image) est monté basculant autour d'un axe 235 perpendiculaire à l'axe optique Δ ; le mouvement de bascule est illustré par la flèche 236.

Ce dispositif de bascule permet, comme illustré figure 7, de compenser les défauts de focalisation dus à la proximité du capteur et de l'objet. En effet, deux points A et B d'un objet situés au même niveau par rapport à l'horizontale vont produire des images en A' et B', respectivement, le point le plus éloigné A produisant une image en avant du plan focal normal P du capteur (c'est-à-dire le plan focal perpendiculaire à l'axe optique Δ), le point le plus proche la produisant en arrière de ce même plan focal.

Le dispositif de bascule est destiné, précisément, à compenser cette anomalie en ramenant le DTC dans un plan P' contenant les points A' et B'. Cette compensation a pour effet d'accroître la profondeur de champ globale du système optique, puisque l'on compense le défaut de focalisation correspondant.

Pour une inclinaison α (figures 1 et 7) de l'axe optique de 45° par rapport à la verticale, la bascule optimale β est de l'ordre de 7° , cette valeur dépendant en fait de la lentille, de la taille du DTC et de la dimension du champ et de divers autres paramètres.

Sur les figures 8 à 10, on a illustré un autre aspect de l'invention, relatif à l'analyse du signal délivré par le DTC 232.

La figure 8 montre, de façon schématique, le signal (analogique) vidéo V(t) délivré pour chaque ligne de balayage du DTC avec, entre deux impulsions de synchronisation, un signal dont l'amplitude varie en fonction de l'énergie lumineuse reçue; ce signal représente, en fait, la trace du faisceau laser.

Le but du circuit est de déterminer, par rapport au début de la ligne, la position de la trace laser, c'est-à-dire celle du pic d'énergie correspondant à la trace (ou, en d'autres termes, la valeur σ représentant le temps écoulé depuis l'impulsion de synchronisation de ligne du signal vidéo). La difficulté vient de ce que, en pratique, la trace ne se présente pas sous la forme d'un pic abrupt, mais présente un certain étalement dû à l'obliquité de l'incidence du faisceau par rapport à la pièce, aux phénomènes de diffraction, à des perturbations diverses, etc.

Plusieurs techniques ont été proposées pour déterminer de façon univoque la position correspondante de la trace.

On peut par exemple fixer un seuil T et décider que la position de la trace correspondra à l'instant situé à mi-chemin entre les deux instants de franchissements, respectivement dans un sens et dans l'autre, de ce seuil. Cette technique suppose cependant que l'étalement du signal est à peu près symétrique, et, d'autre part, est difficile à mettre en oeuvre en raison du caractère très variable du seuil à prévoir.

Une autre technique consiste à différencier le signal vidéo et à décider que la position de la trace correspond à l'inversion de signe du signal dérivé. Cette technique, comme dans le cas précédent, a pour inconvénient de présupposer que l'étalement du signal est sensiblement symétrique, et présente en outre l'inconvénient supplémentaire, propre à tout traitement de signal impliquant une différenciation, de venir amplifier les effets du bruit et des perturbations diverses.

L'invention propose de procéder par une autre technique, consistant essentiellement à intégrer le signal vidéo et à décider que la position de la trace correspond au milieu d'énergie du signal vidéo, c'est-à-dire à l'endroit pour lequel (cf. figure 10a) les aires S_1 et S_2 sont égales.

Cette technique a comme premier avantage de présenter une excellente immunité au bruit, du fait de l'intégration.

En outre, elle peut être mise en oeuvre par un circuit électronique analogique extrêmement simple, que l'on a illustré figure 9.

Ce circuit comprend essentiellement un étage intégrateur 241 recevant en entrée le signal vidéo V(t) (ligne (a) du chronogramme de la figure 10) et délivrant en sortie un signal intégré $S(t) = \int V(t)$ (l'intégrateur

est remis à zéro par l'impulsion de synchronisation de ligne du signal vidéo).

Ce signal $S(t)$ est appliqué à deux branches distinctes 242 et 243. La branche 242 comporte un simple diviseur de tension délivrant en sortie un signal $S(t)/2$ d'amplitude moitié du signal $S(t)$. La branche 243 comporte une ligne à retard, de préférence une ligne à retard programmable, retardant d'une durée τ le signal $S(t)$, qui devient alors en sortie $S(t-\tau)$. Les deux signaux ainsi obtenus, qui sont illustrés respectivement sur les lignes (b) et (c) du chronogramme de la figure 10, sont alors appliqués aux deux entrées respectives d'un comparateur 244 qui va alors basculer à l'instant auquel (à τ près) $S(t)/2 = S(t-\tau)$, c'est-à-dire pour lequel les aires S_1 et S_2 sont égales. La ligne (d) du chronogramme de la figure 10 montre le signal $\Sigma(t)$ en sortie du comparateur 244.

Le retard τ de la ligne à retard 243 est choisi de manière à être au moins égal au plus large signal vidéo représentatif de la trace laser que l'on soit susceptible de rencontrer, c'est-à-dire qu'il doit être choisi en fonction de l'étalement maximal prévisible de la trace. En général, une valeur de 50 à 100 ns est satisfaisante à cet égard.

Il est également possible de mettre en oeuvre ce processus sous forme numérique, comme on va le décrire en référence aux figures 11 et 12.

Dans ce cas, le signal vidéo analogique $V(t)$, dont un exemple est donné figure 11a, est préalablement numérisé au moyen d'un convertisseur analogique/numérique 245, qui peut d'ailleurs être incorporé soit au capteur (ce qui autorise une plus grande immunité aux bruit), soit même à la caméra proprement dite, dans le cas d'un composant à sortie numérique directe.

Le signal numérique $B_i(t)$ obtenu, illustré figure 11b, se présente, pour chaque ligne vidéo, sous forme d'une série d'échantillons successifs de valeur B_i , la numérisation de cette valeur s'effectuant généralement sur 8 bits. Le premier échantillon non nul est le $P^{\text{ème}}$ et le dernier est le $Q^{\text{ème}}$. Le traitement consiste à rechercher, d'une part, quel est le $M^{\text{ème}}$ échantillon correspondant au milieu d'énergie du signal vidéo (c'est-à-dire l'endroit pour lequel les aires S_1 et S_2 , après numérisation, sont égales) et, d'autre part, la position de ce milieu énergétique à l'intérieur du $M^{\text{ème}}$ échantillon, c'est-à-dire la valeur m , comprise entre 0 et 100%, représentée figure 11b.

Cette valeur m est déterminée de la manière suivante.

L'énergie totale Σ , c'est-à-dire la surface des aires hachurées I à IV sur la figure 11b, est :

$$\Sigma = \sum_P^Q B_i.$$

Si le milieu d'énergie se trouve sur l'échantillon de rang M (avec $P \leq M \leq Q$), on a alors la relation suivante, qui exprime que la surface des aires I + II est égale à la surface des aires III + IV :

$$\sum_P^{M-1} B_i + m \cdot B_M = (1-m) \cdot B_M + \sum_{M+1}^Q B_i,$$

ce qui, en d'autres termes, peut s'écrire :

$$m \cdot B_M = \Sigma/2 - \sum_P^{M-1} B_i. \quad (1)$$

À cet effet, le signal numérique B_i en sortie du convertisseur 245 est appliqué à un registre accumulateur 241 (jouant le rôle de l'étage intégrateur portant la même référence dans la mise en oeuvre analogique), cet accumulateur étant un additionneur temps réel dont la valeur de sortie sera un signal d'énergie Σ croissant au cours du temps (analogue au signal illustré figure 10b dans la version analogique). On notera que le séquençement des différentes opérations ne commence que lorsque l'on reçoit un échantillon non nul, c'est-à-dire le $P^{\text{ème}}$ échantillon, dont l'apparition en sortie du convertisseur 245 initialise

et déclenche un circuit séquenceur 246 assurant la commande temporelle des différents étages numériques du circuit.

Le signal d'énergie Σ en sortie de l'accumulateur 241 est appliqué, d'une part, à un diviseur par deux 242 pour donner un signal $\Sigma/2$ (dans cette variante numérique, la division par deux est obtenue par simple décalage d'un bit vers la droite, donc par un simple câblage approprié), et d'autre part, à un registre à décalage 243 faisant fonction d'étage retard. La taille de ce registre à décalage est choisie de manière à être au moins égale au plus grand nombre de pixels de la trace vidéo que l'on soit susceptible de rencontrer, afin de n'être jamais saturé.

sortie du diviseur 242 et celle du registre 243 sont appliquées aux deux entrées d'un circuit soustracteur 244 faisant fonction de comparateur : en effet, le résultat de la soustraction deviendra négatif dès que l'on aura :

$$m.B_M > \Sigma/2 - \sum_{P=0}^{M-1} B_i,$$

c'est-à-dire dès que l'on aura dépassé le point de milieu d'énergie.

En d'autres termes, on sait que, à cet instant (et au retard près introduit par le registre 243), on se situe exactement sur l'échantillon de rang M.

Ce basculement est détecté par un bit d'état S dont le changement de valeur indique que, en sortie du soustracteur 244, on dispose de la valeur :

$$\Sigma/2 - \sum_{P=0}^{M-1} B_i,$$

c est-à-dire de la valeur $m.B_M$ de l'équation (1).

La valeur B_M est connue par ailleurs, par exemple en sortie d'un registre à décalage 248 de même taille que le registre 243 et recevant en entrée les échantillons successifs B_i .

Plutôt que de procéder à une division numérique pour obtenir la valeur recherchée m à partir du produit $m.B_M$ (l'autre valeur recherchée M , c'est-à-dire le rang de l'échantillon contenant le point de milieu d'énergie, étant donné directement par la logique de comptage du séquenceur 246), solution qui serait difficile et coûteuse à mettre en oeuvre en temps réel, on préfère utiliser une mémoire 247 de 64 Ko contenant les 256 valeurs possibles de m (chaque valeur étant codée sur un octet) en fonction de $m.B_M$, d'une part, et de B_M d'autre part. Ces deux dernières informations, d'un octet chacune, sont appliquées aux entrées d'adresse A_1 , A_2 de la mémoire 247.

Lors du basculement du circuit 244, on applique la valeur $m.B_M$ en sortie de ce circuit à l'entrée A_1 , et la valeur B_M à l'entrée A_2 : on obtient alors immédiatement et directement, sur la sortie de donnée D, la valeur m recherchée.

Comme on peut le voir, cette forme particulière de mise en oeuvre du circuit permet de calculer en temps réel la position du point de milieu d'énergie du signal vidéo et ce, avec une très grande précision (de l'ordre d'un dixième de pixel de résolution au moins).

Revendications

1. Un capteur optique de formes tridimensionnelles, comportant une source laser produisant un faisceau plan lamellaire (4) illuminant la surface d'un objet (2) de manière à produire sur ce dernier une trace lumineuse incidente (5) curviligne analysée par au moins une caméra vidéo produisant une information convertie en données numériques représentatives de coordonnées de pixels,

caractérisé par une boîte à lumière (100) comprenant, dans un même boîtier placé au-dessus de l'objet à analyser et à faible distance de celui-ci :

- ladite source laser (110), produisant un faisceau rectiligne collimaté,
- des moyens optiques (120) pour transformer ce faisceau rectiligne en un faisceau plan lamellaire, et

- des moyens d'allongement du trajet optique du faisceau (140), comprenant deux miroirs plans fixes (142, 143), disposés en vis-à-vis de manière à produire une pluralité de réflexions entre un point d'entrée (141) et un point de sortie (144) du faisceau, de manière à compenser le faible recul matériel entre le boîtier et l'objet par un recul optique virtuel et accroître ainsi corrélativement la profondeur de champ de la région utile (7) du faisceau plan lamellaire en sortie du boîtier.

2. Le capteur de la revendication 1, dans lequel les points d'entrée et de sortie (141, 144) comprennent des moyens optiques de réglage d'incidence de faisceau, de manière à ajuster le nombre de réflexions entre les deux miroirs en vis-à-vis.

3. Le capteur de la revendication 1, dans lequel les moyens optiques (120) pour transformer le faisceau rectiligne en un faisceau plan lamellaire sont des moyens statiques.

4. Le capteur de la revendication 1, comprenant en outre au moins un bloc détecteur (200) attaché à la boîte à lumière et pourvu d'un organe photoélectrique analyseur d'image (232) et de moyens formant objectif (231), placés devant cet organe analyseur d'image.

5. Le capteur de la revendication 4, comprenant en outre des moyens de bascule relative de l'organe analyseur d'image par rapport aux moyens formant objectif.

6. Le capteur de la revendication 4, comportant en outre un circuit électronique d'extraction de l'information représentative de la position de la trace du faisceau laser sur chaque ligne d'image délivrée par l'organe analyseur d'image, ce circuit comprenant :

- un étage intégrateur (241), recevant en entrée un signal électrique représentatif de l'intensité lumineuse reçue, variant en fonction de la position considérée sur la ligne analysée, et délivrant en sortie un signal, croissant, représentatif de l'énergie lumineuse cumulée reçue,
- un étage diviseur (242), recevant en entrée le signal d'énergie délivré par l'étage intégrateur,
- un étage à retard (243), recevant en entrée le signal d'énergie délivré par l'étage intégrateur, et
- un étage comparateur (244), recevant sur chacune de ses entrées les signaux de sortie respectifs de l'étage diviseur et de l'étage à retard, le basculement de cet étage comparateur définissant, au cours du balayage de la ligne d'image, la position du milieu de la trace du faisceau laser.

Claims

1. An optical sensor for three-dimensional shapes, comprising a laser source producing a plane lamellar beam (4) illuminating the surface of an object (2) in such a manner as to produce on the said object a luminous incident curved path (5) analysed by at least one video camera producing information converted into numerical data representative of pixel coordinates, **characterized by** a light box (100) comprising, in the same casing positioned above the object to be analysed and at a short distance therefrom:

- the said laser source (110), producing a collimated rectilinear beam;
- optical means (120) to convert the said rectilinear beam into a plane lamellar beam; and
- means for extending the optical path of the beam (140) comprising two fixed plane mirrors (142, 143) arranged opposite one another in such a manner as to produce a plurality of reflections between an entry point (141) and an exit point (144) of the beam;

in such a manner as to counterbalance the low physical distance between the casing and the object, by a virtual optical distance, and thus correlatively to increase the depth of field of the effective region (7) of the plane lamellar beam leaving the casing.

2. A sensor in accordance with claim 1, wherein the entry and exit points (141, 144) comprise optical means for controlling the incidence of the beam, in such a manner as to adjust the number of reflections between the two opposite mirrors.

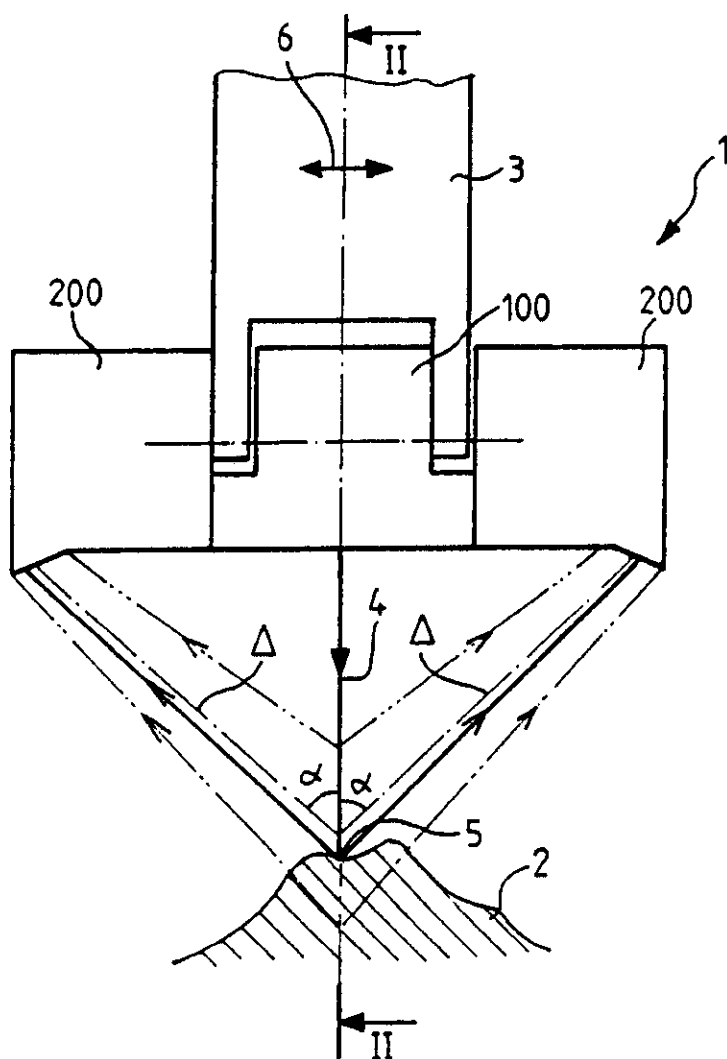
3. A sensor in accordance with claim 1, wherein the optical means (120) to convert the rectilinear beam into a plane lamellar beam are static means.

4. A sensor in accordance with claim 1, additionally comprising at least one detector block (200) abutting the light box and provided with an image-analysing photoelectric body (232) and means forming a lens (231) positioned in front of the said image-analysing body.
5. A sensor in accordance with claim 4, additionally comprising means for relative tilting of the image-analysing body in relation to the means forming the lens.
6. A sensor in accordance with claim 4, additionally comprising an electronic circuit to extract the information representing the position of the laser beam path on each line of the image delivered by the image-analysing body, the said circuit comprising:
 - an integration stage (241) receiving at the point of entry an electric signal representative of the intensity of light received, varying according to the position being considered on the analysed line, and delivering at the exit an increasing signal representative of the accumulated luminous energy received;
 - a dividing stage (242) receiving at the point of entry the energy signal delivered by the integration stage;
 - a delay stage (243) receiving at the point of entry the energy signal delivered by the integration stage; and
 - a comparison stage (244) receiving at each of its points of entry the respective exit signals from the dividing stage and the delay stage, the switching of the said comparison stage defining the position of the centre of the laser beam path, during scanning of the line of the image.

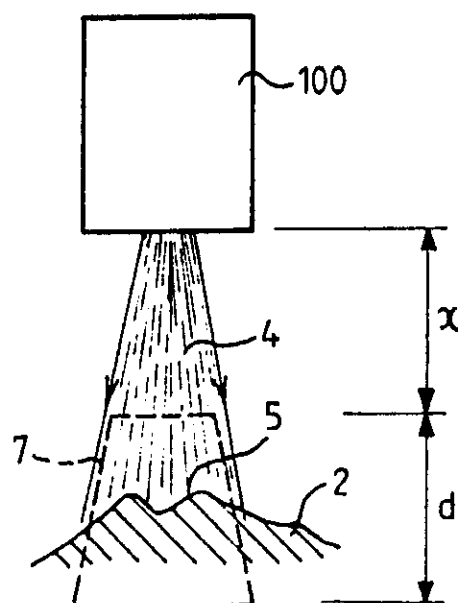
Patentansprüche

1. Optischer Sensor für dreidimensionale Formen, der eine Laserquelle umfaßt, welche ein ebenes, lamelliertes Strahlenbündel (4) erzeugt, das die Oberfläche eines Objektes (2) derart beleuchtet, daß auf dem Objekt eine einfallende, krummlinige Leuchtspur (5) erzeugt wird, die durch mindestens eine Videokamera analysiert wird, die digitale Daten erzeugt, welche für Pixelkoordinaten repräsentativ sind, gekennzeichnet durch einen Lichtkasten (100), der in demselben Gehäuse, welches oberhalb des zu analysierenden Objektes und in geringer Entfernung desselben angebracht ist, folgendes umfaßt:
 - die Laserquelle (110), die ein durch Blenden geformtes, geradliniges Strahlenbündel erzeugt,
 - optische Mittel (120), um dieses blandengeformte, geradlinige Strahlenbündel, in ein ebenes, lamelliertes Strahlenbündel umzuwandeln, und
 - Mittel zur Verlängerung des optischen Weges des Strahlenbündels (140), die zwei feststehende, ebene Spiegel (142, 143) umfassen, die derart gegenüberliegend angebracht sind, daß eine Vielzahl von Spiegelungen zwischen einem Eingangspunkt (141) und einem Ausgangspunkt (144) des Strahlenbündels erzeugt werden,
 mit dem Zweck, den geringen physischen Abstand zwischen Gehäuse und Objekt zu kompensieren und somit entsprechend die Schärfentiefe des nutzbaren Bereichs (7) des ebenen, lamellierten, aus dem Gehäuse kommenden Strahlenbündels zu erhöhen.
2. Der Sensor aus Anspruch 1, bei welchem die Ein- und Ausgangspunkte (141, 144) optische Mittel für die Einstellung des Einfalls des Strahlenbündels umfassen, um die Zahl der Spiegelungen zwischen den zwei gegenüberliegenden Spiegeln einzustellen.
3. Der Sensor aus Anspruch 1, wobei es sich bei den optischen Mitteln (120) zum Umwandeln des geradlinigen Strahlenbündels in ein ebenes, lamelliertes Strahlenbündel, um statische Mittel handelt.
4. Der Sensor aus Anspruch 1, der zudem mindestens einen Detektorblock (200) umfaßt, der neben dem Lichtkasten liegt und über ein photoelektrisches Bildanalysenorgan (232) sowie über Mittel, die ein Objektiv bilden (231) und vor diesem Bildanalysenorgan angebracht sind, verfügt.
5. Der Sensor aus Anspruch 4, der zudem über Mittel zum relativen Kippen des Bildanalysenorgans gegenüber den Mitteln, die das Objektiv bilden, verfügt.
6. Der Sensor aus Anspruch 4, der zudem über einen elektronischen Schaltkreis zum Extrahieren der repräsentativen Information für die Lage der Spur des Laserstrahlenbündels auf jede durch das Bildanalysenorgan gelieferte Bildlinie verfügt, wobei der Schaltkreis umfaßt:

- eine Integratorstufe (241), die an ihrem Eingang ein elektrisches Signal empfängt, welches repräsentativ für die empfangene Lichtstärke ist und als Funktion der auf der analysierten Linie berücksichtigten Position variiert, und an seinem Ausgang ein für die empfangene, kumulierte Lichtintensität repräsentatives zunehmendes Signal herausgibt,
- eine Teilungsstufe (242), die an ihrem Eingang das durch die Integratorstufe abgegebene Energiesignal empfängt,
- eine Verzögerungsstufe (243), die am Eingang das durch die Integratorstufe abgegebene Energiesignal empfängt,
- eine Vergleichsstufe (244), die an jedem ihrer Eingänge die entsprechenden Ausgangssignale der Teilungsstufe und der Verzögerungsstufe empfängt, wobei das Kippen dieser Vergleichsstufe im Verlauf der Abtastung der Bildlinie, die Lage des Mittelpunkts der Spur des Laserstrahlenbündels definiert.

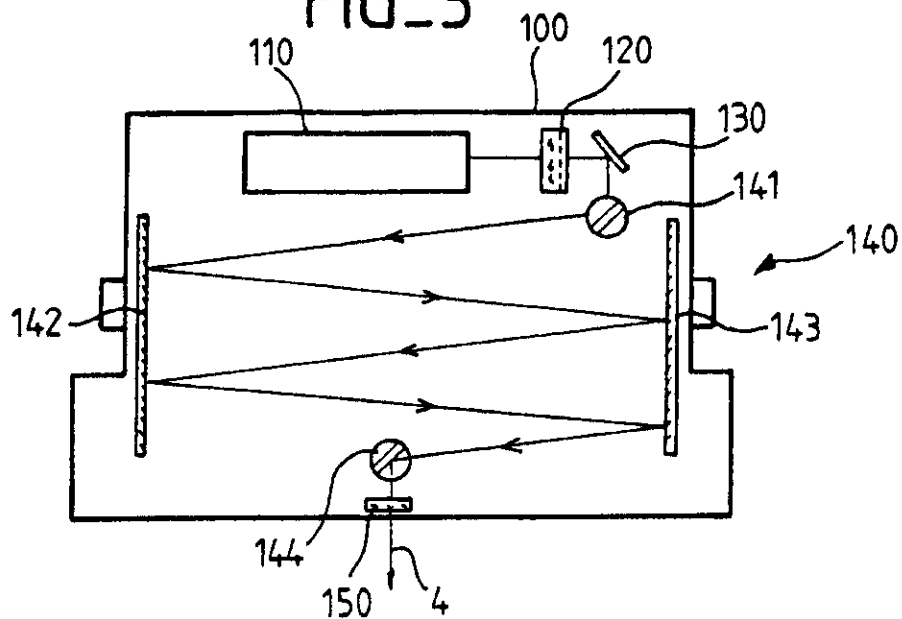


FIG_1

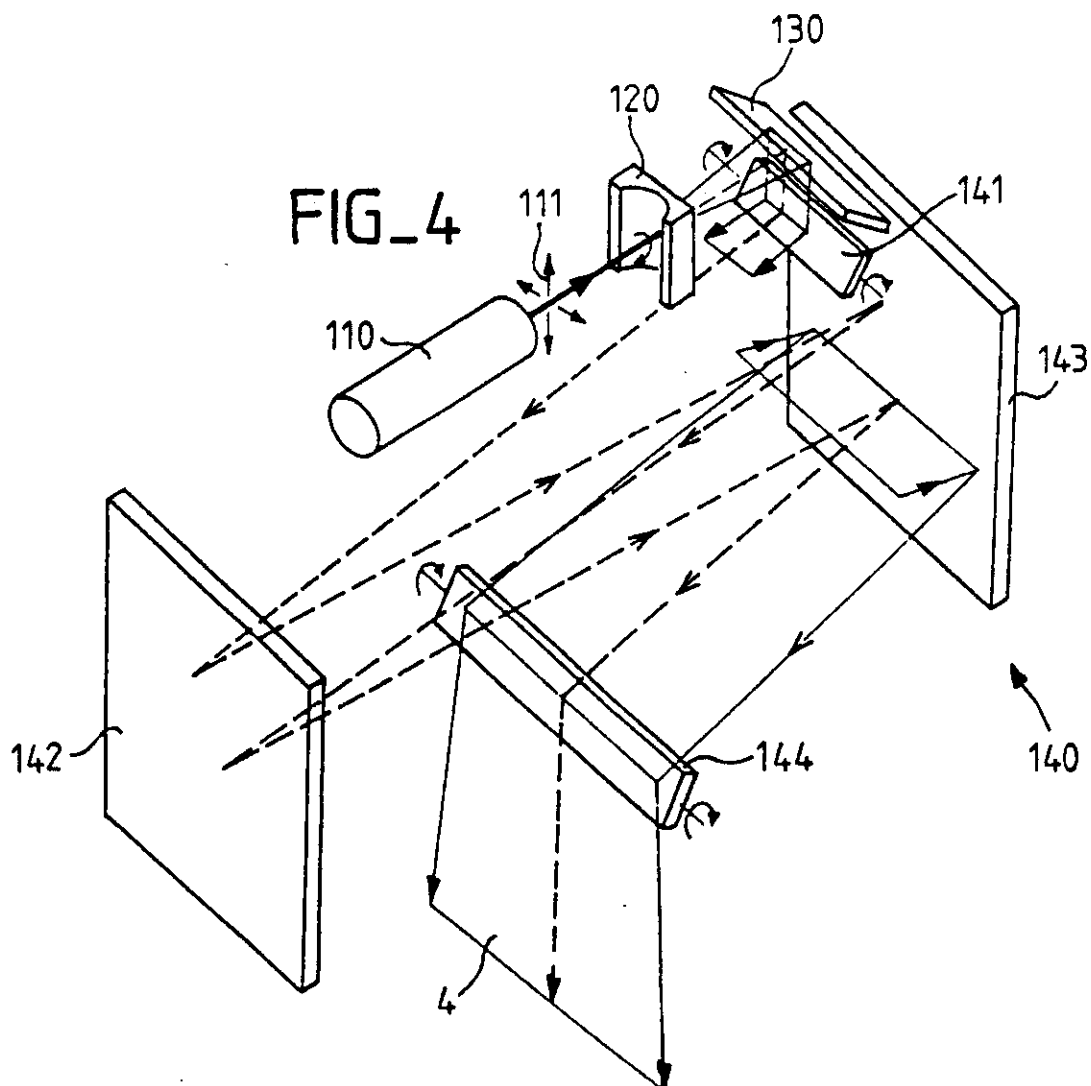


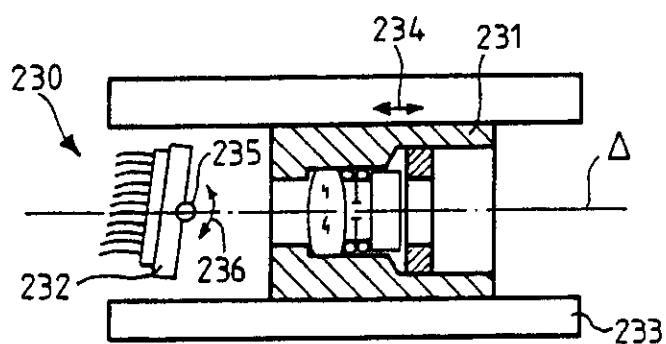
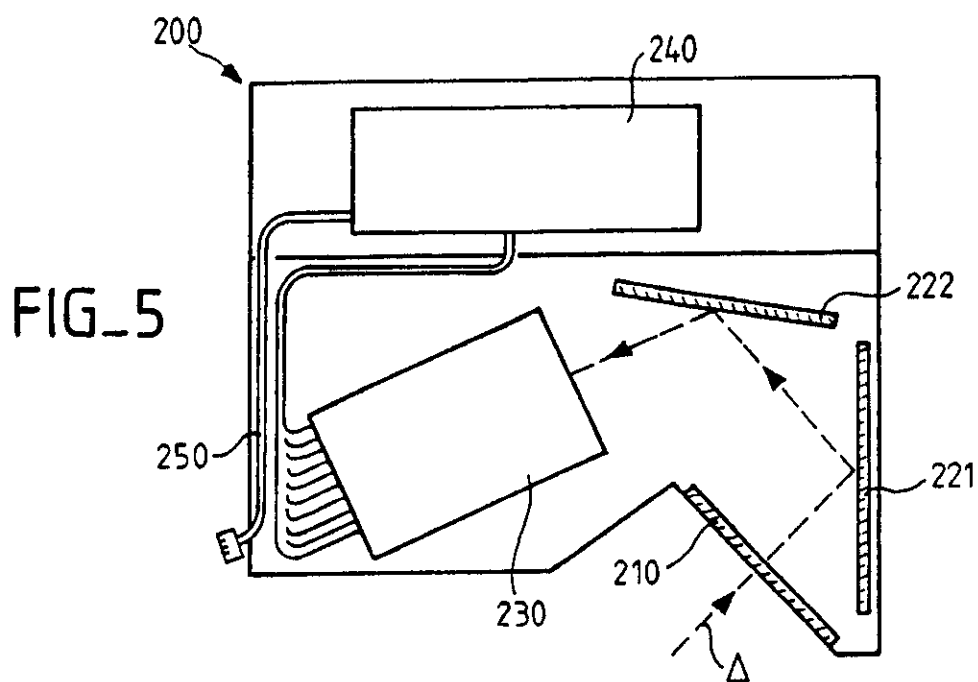
FIG_2

FIG_3

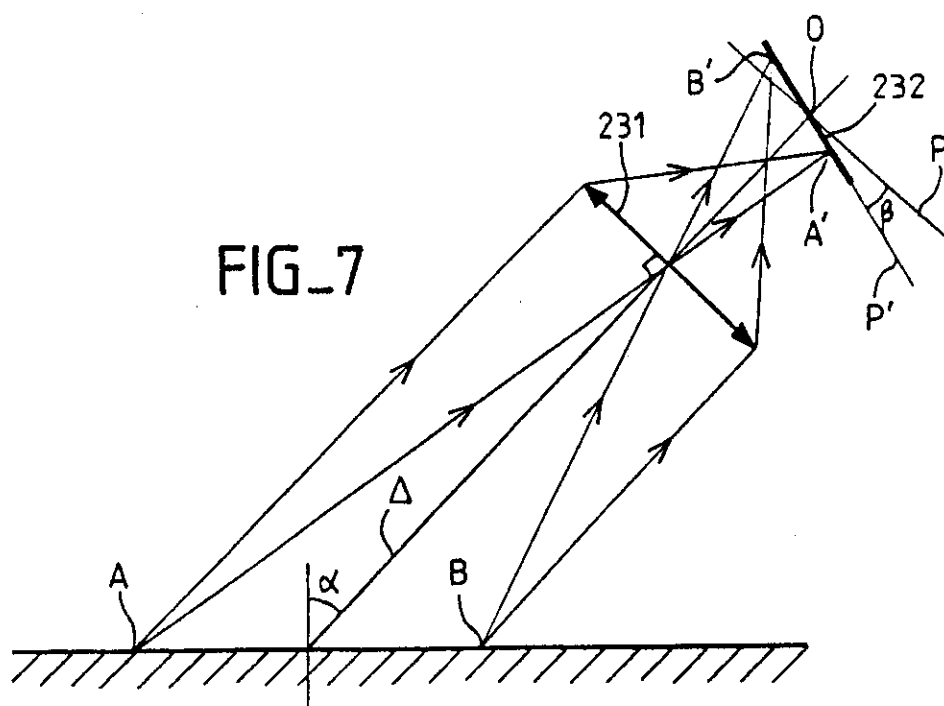


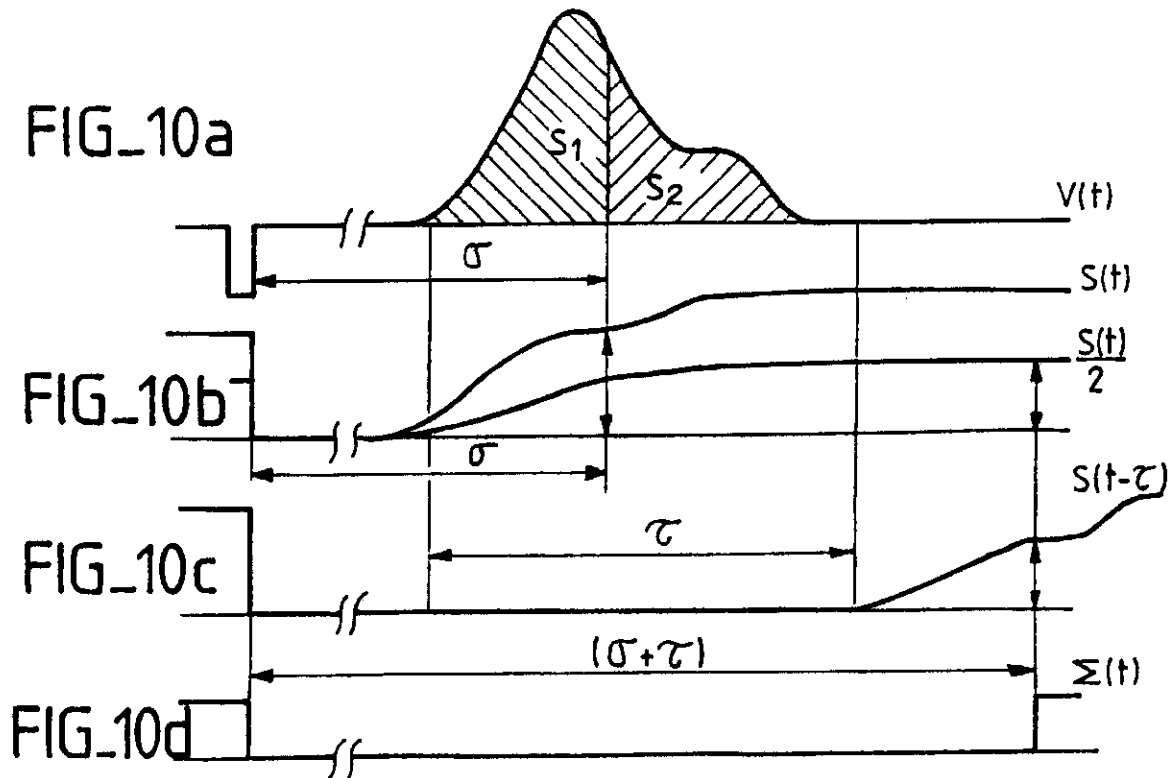
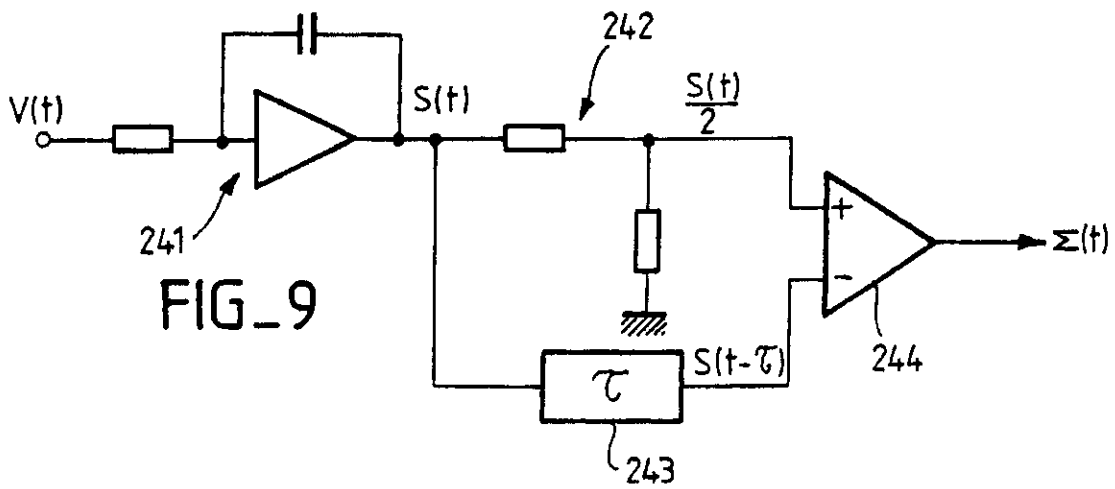
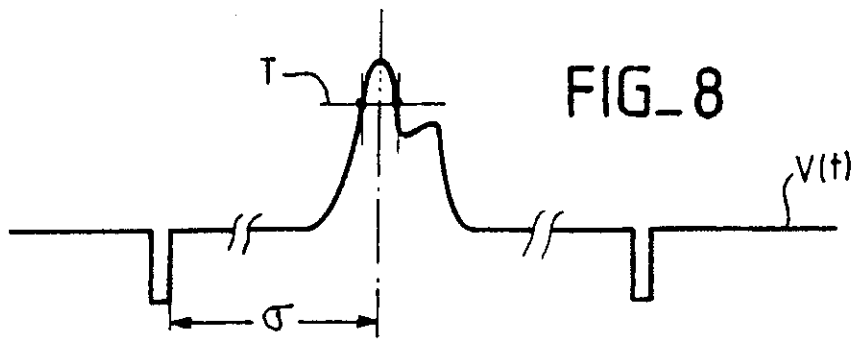
FIG_4

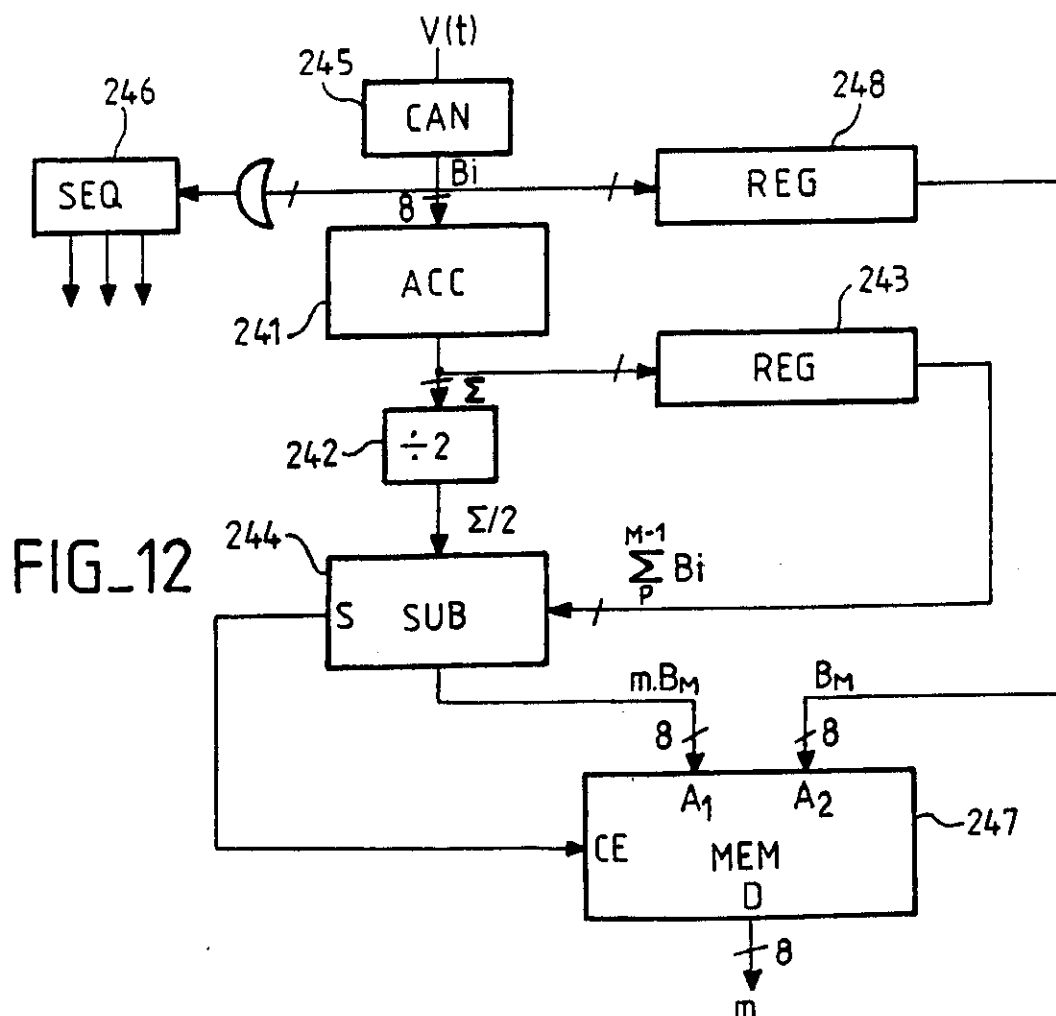
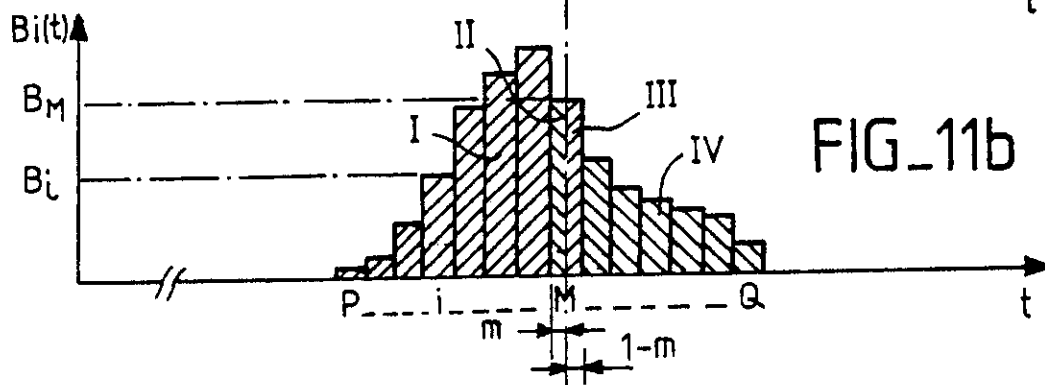
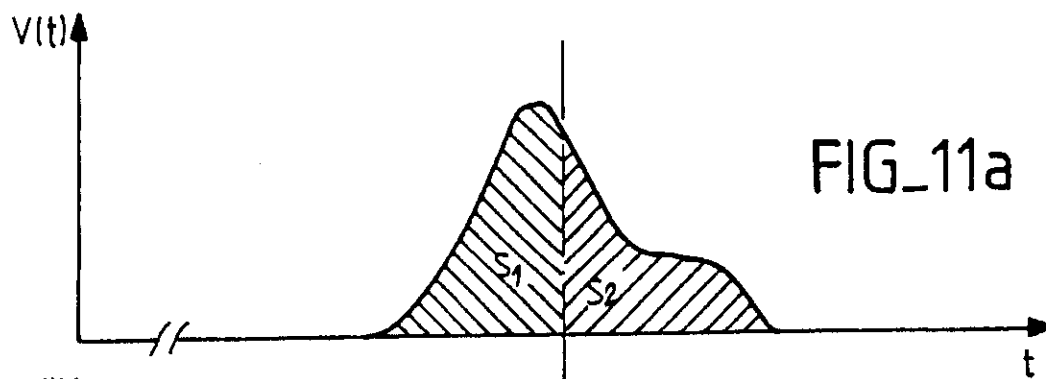




FIG_6







REGISTER ENTRY FOR EP0550300/

European Application No EP92403280.8 filing date 04.12.1992

Application in French

Priority claimed:

30.12.1991 in France - doc: 9116305

Designated States BE DE DK ES GB GR IE IT LU NL PT

Title COMPACT OPTICAL SENSOR OF HIGH RESOLUTION FOR ANALYSING
THREE-DIMENSIONAL SHAPES.

Applicant/Proprietor

SA KREON INDUSTRIE, Rue Nicolas Appert, F-87021 Limoges, France

[ADP No. 59656116002]

Inventors

ERIC COSNARD, Barbe d'Or, 4107, F-31180 La Peyrouse-Fossat, France

[ADP No. 61032645001]

JAN STEUPERAERT, Les régourdes, F-31460 Le Faget, France

[ADP No. 61032652001]

Classified to

G1A

G01B

Address for Service

MARKS & CLERK, 57-60 Lincoln's Inn Fields, LONDON, WC2A 3LS, United

Kingdom

[ADP No. 00000018001]

EPO Representative

CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain 30, rue la Boétie, F-75008 Paris,

France

[ADP No. 50216829001]

Publication No EP0550300 dated 07.07.1993 and granted by EPO 08.03.1995.

Publication in French

Examination requested 26.11.1993

Patent Granted with effect from 08.03.1995 (Section 25(1)) with title COMPACT
OPTICAL SENSOR OF HIGH RESOLUTION FOR ANALYSING THREE-DIMENSIONAL SHAPES..
Translation filed 06.04.1995

21.07.1993 Translation of claims filed under S78(7) on 16.07.1993.

Entry Type 10.1 Staff ID. AC2 Auth ID. F56

21.07.1993 FILE RAISED.

Entry Type 10.1 Staff ID. AC2 Auth ID. AO

21.07.1993 MARKS & CLERK, 57-60 Lincoln's Inn Fields, LONDON, WC2A 3LS, United
Kingdom [ADP No. 00000018001]

registered as address for service

Entry Type 8.11 Staff ID. AC2 Auth ID. F56

03.02.1995 Notification from EPO of change of EPO Representative details from
CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain 30, rue la Boétie, F-75008
Paris, France [ADP No. 50216829001]
to
CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain S.A. 3, rue Moncey, F-75009
Paris, France [ADP No. 50216829001]
Entry Type 25.14 Staff ID. RD06 Auth ID. EPT

**** END OF REGISTER ENTRY ****

OA80-01
EP

OPTICS - PATENTS

05/06/95 09:36:29
PAGE: 1

RENEWAL DETAILS

PUBLICATION NUMBER EP0550300

PROPRIETOR(S)

SA KREON INDUSTRIE, Rue Nicolas Appert, F-87021 Limoges, France

DATE FILED 04.12.1992

DATE GRANTED 08.03.1995

DATE NEXT RENEWAL DUE 04.12.1996

DATE NOT IN FORCE

DATE OF LAST RENEWAL

YEAR OF LAST RENEWAL 00

STATUS PATENT IN FORCE

**** END OF REPORT ****

THE PATENT OFFICE

PATENTS ACT 1977

PATENTS FORM NO. 54/77

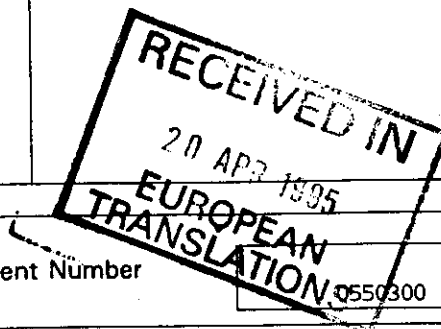
12 APR 1995 #00282567

PAT 54 77 UC

35.00

FILING OF TRANSLATION OF EUROPEAN
PATENT (UK) UNDER SECTION 77(6)(a)

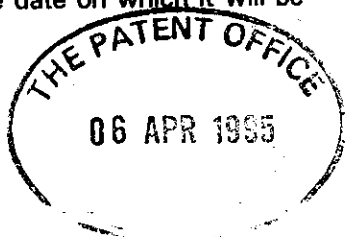
230Pb8358



Please write or type in **BLOCK LETTERS** using dark ink. For details of current fees please contact the Patent Office.

Enter the name and address of the proprietor(s) of the European Patent (UK). If you do not have enough space please continue on a separate sheet.

Enter the date on which the mention of the grant of the European Patent (UK) was published in the European Patent Bulletin, or, if it has not yet been published, the date on which it will be published



A UK Address for Service **MUST** be provided to which all communications from the Patent Office will be sent

Please sign here ►

Attention is drawn to rules 90 and 106 of the Patents Rules 1982

This form must be filed in duplicate and must be accompanied by a translation into English in duplicate of:

- 1 the whole description
- 2 those claims appropriate to the UK (in the language of the proceedings),
- 3 all drawings, whether or not these contain any textual matter

but **excluding** the front page which contains bibliographic information.

The translation must be verified to the satisfaction of the comptroller as corresponding to the original text.

1 European Patent Number

0550300

2 Name

SA Kreon Industrie

Address

Rue Nicolas Appert
F-87021 Limoges
France

3 European Patent Bulletin Date:

08 Mar 1995
Day Month Year

4 Name of Agent (if any)

Marks & Clerk

Agent's Patent Office
ADP number (if known)

18001

5 Address for Service

57-60 Lincoln's Inn Fields
LONDON
WC2A 3LS.

Postcode

6 Signature:

Marks & Clerk

Date: 06 Apr 1995
Day Month Year

Reminder

Have you attached

One duplicate copy of this form



Two copies of the Translation



Any continuation sheets
(if appropriate)



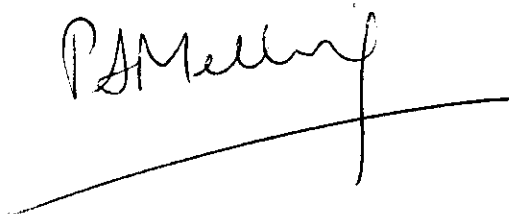
0650300

PATENTS ACT 1977

IN THE MATTER OF a European
Patent (UK) in the name of
SA KREON INDUSTRIE

I, Pamela Alison Melling, BA (Hons.) dip., of 41 Leighton Close, Edgware,
Middlesex HA8 5SE, Translator to Marks & Clerk, 57/60 Lincoln's Inn Fields,
London WC2A 3LS, fully conversant with the English and French languages,
hereby certify that to the best of my knowledge and belief the following is a true
translation into the English language, which has been made by me, of the
specification of the European Patent no.: 0550300
Application no.: 92403280.8

Signed, this 29th day of March 1995

A handwritten signature in cursive script, reading 'P. Melling', followed by a long horizontal line extending to the right.

European Patent Application No.: 92403280.8
Publication no.: 0550300

Translation

The invention relates to acquisition and digitisation in three dimensions of the shape of any irregular part, using systems comprising an optical sensor with a laser irradiation source and one or more cameras analysing the path formed by the laser beam on the object to be studied.

A process of this type is described in detail, particularly in FR-A-2 627 047, FR-A-2 642 833 and FR-A-2 629 198, which belong to the applicant.

More particularly, this process makes it possible to produce a "laser plane", i.e. a sectorial lamellar beam of very slight thickness, but of a width allowing it to cover the whole of the object for analysis, with one or two cameras facing the said plane at two different incidences. The assembly is positioned at the end of a movable manipulator arm, for example that of a numerically-controlled machine tool, in order for the laser plane to scan the part and thus allow progressive acquisition of the surface of the part, in all three dimensions. The scanning process can equally be carried out by pivoting as well as translation of the sensor in relation to the part; alternatively, the scanning movement can also be obtained by keeping the sensor still and moving the part in relation thereto, the part being in this case mounted on a remote-controlled cross table, for example.

To date, the sensors used to carry out this process have been relatively large, fragile and complex.

One of the objects of the invention is to propose a sensor structure making it possible to miniaturise the sensor to a considerable extent, whilst maintaining and even increasing its precision and resolution ("resolution" being the size of the pixel of the system and "precision" being that which is obtained, taking into account the digitisation and reconstitution stages; the precision of position, as will be demonstrated, can be better than the pixel, given the various types of processing carried out during the stage of analysis of the laser path).

The interest in having a miniaturised sensor, besides the convenience which it affords, is that it allows use thereof even in a greatly reduced space, for parts of small dimensions, surfaces which are difficult to reach etc., i.e. on each occasion when great precision is required in a reduced working area.

However, in this case the sensor will be positioned much more closely to the part for analysis, and thus a certain number of new problems will arise, particularly that of depth of field, which will deteriorate as the sensor is brought closer to the object.

Currently, He-Ne laser sensors are set to focus approximately 1 m from the source, hence at a significant distance (which is, in any case, essential, because of the relatively large size of the helium-neon laser and the different members associated therewith).

This substantial distance makes it possible for the long-distance focusing to produce a very fine path with a large depth of field, typically with a lamellar beam of less than 0.2 mm thickness over a depth of field of 100 mm.

Moreover, as the lamellar beam is produced by static means (generally a cylindrical lens) the spread of the beam combined with the significant distance means that the local energy density is relatively weak (in the order of $1 \mu\text{W}/\text{mm}^2$) which means that the laser is safe for the operator.

Conversely, if the sensor could be miniaturised (in particular by integration of a laser diode to replace the He-Ne laser) and if the user cannot or does not want to move it back in relation to the object, a problem will arise with regard to depth of field because of focusing at a much shorter distance (typically 10 cm instead of 1 m) with a corresponding influence on the fineness of the beam, and hence on the resolution and the final precision.

Moreover, the energy density, which varies inversely to the distance, will increase significantly, thus making the laser dangerous if it comes near the eye of an operator in the vicinity of the object.

The object of the invention is to preserve the advantages of existing sensors, despite miniaturisation and the much smaller physical distance from the object.

Essentially the invention consists of creating a virtual distance from the source inside the sensor, so as to produce substantially the same conditions as those for a beam with a long focusing distance, thus compensating for the small physical distance imposed by the arrangement of the sensor/object assembly.

To this end, the sensor of the invention, comprising in a manner known *per se* and described, for example, in the three aforementioned patents, a laser source producing a plane lamellar beam illuminating the surface of an object in such a manner as to produce on the said object a luminous incident curved path analysed by at least one video camera producing information converted into digital data representative of pixel co-ordinates, is characterised by a light box comprising, in the same casing positioned above the object to be analysed and at a short distance therefrom: the said laser source, producing a collimated rectilinear beam; optical means to convert the said rectilinear beam into a plane lamellar beam; and means for extending the optical path of the beam, comprising two fixed plane mirrors arranged opposite one another in such a manner as to produce a plurality of reflections between an entry point and an exit point of the beam. In this manner the low physical distance between the casing and the object is compensated by a virtual optical distance, and thus the depth of field of the effective region of the plane lamellar beam leaving the casing is correspondingly increased.

It is advantageous for the entry and exit points to comprise optical means for controlling the incidence of the beam, in such a manner as to adjust the number of reflections between the two opposed mirrors, and for the optical means converting the rectilinear beam into a plane lamellar beam to be static means.

More particularly, the sensor can also comprise at least one detector block abutting the light box and provided with an image-analysing photoelectric element, and means forming an objective positioned in front of the said image-analysing element.

In this case, in accordance with an advantageous feature of the invention, means are also provided for relative tilting of the image-analysing element in relation to the means forming the objective.

In accordance with a further advantageous feature of the invention, an electronic circuit is also provided, to extract the information representing the position of the laser beam path on each line of the image delivered by the image-analysing element, the said circuit comprising: an integration stage receiving at the input an electric signal representative of the intensity of light received, varying according to the position being considered on the analysed line, and delivering to the output an increasing signal representative of the accumulated luminous energy received; a dividing stage receiving at the input the energy signal delivered by the integration stage; a delay stage receiving at the input the energy signal delivered by the integration stage; and a comparison stage receiving at each of its inputs the respective output signals from the dividing stage and the delay stage, the switching of the said comparison stage defining the position of the centre of the laser beam path, during scanning of the line of the image.

One embodiment of the invention will now be described, with reference to the attached drawings.

- Fig. 1 is a front elevation of a sensor in accordance with the invention, with a light box and two adjoining detectors, the assembly being mounted at the end of a movable manipulator arm;
- Fig. 2 is a lateral view, along II-II of fig. 1, of the same assembly;
- Fig. 3 is a schematic sectional view of the light box of the sensor in accordance with the invention;
- Fig. 4 is a perspective view showing the various optical members of the light box;
- Fig. 5 is a schematic sectional view of one of the detectors in the sensor of the invention;

Fig. 6 is a schematic sectional view of the objective/analysing device assembly of the sensor of fig. 5;

Fig. 7 is a diagram showing the manner in which lack of precision and depth of field are offset by a system of tilting the photoelectric element in the detector;

Fig. 8 is the general form of the video signal of a scanning line leaving the photoelectric element.

Fig. 9 is an electronic diagram of a circuit for analysing the said signal allowing extraction of information representing the position of the laser beam path; ,

Fig. 10 is a timing diagram showing various signals produced inside the circuit of fig. 9;

Figs. 11 and 12 show a digital variant for implementing the system for analysis of the signal, fig. 9 showing an analogue version for analysis thereof.

Fig. 1 shows the sensor of the invention, generally designated by the reference numeral 1.

The said sensor is situated in close proximity to a part 2 for analysis, it being sought to acquire and digitise the irregular shape of the surface thereof. The sensor 1 is mounted on the end of a manipulator arm 3, for example that of a numerically-controlled machine tool, and it comprises a central member 100, namely a light box emitting a laser beam 4 which is a plane lamellar beam, i.e. of slight thickness (cf. fig. 1) but of substantial width (cf. fig. 2). The impact of the beam on the surface of the part produces a luminous curved path 5, which is analysed by one or (preferably) two detectors 200, each of which comprises a camera and electronic circuits for digitisation and analysis of the image from the camera. The two detectors 200 are advantageously provided in the form of members adjoining the light box 100 and arranged on either side thereof, so as to form a single assembly (the sensor 1) supported by the manipulator arm 3. The use of two cameras makes it possible to reduce

considerably the time taken for acquisition of the three-dimensional shape, but this is not a necessary feature of the invention, as it is possible for the sensor only to have a single camera.

The sensor carries out scanning so as to acquire the whole shape of the part. In the example shown, the scanning is translatory, carried out by displacement of the manipulator arm 3 in a direction (shown by the arrow 6) perpendicular to the plane of the lamellar beam, typically with an advance speed of 2 to 3 steps per second, each step being in the order of 0.1 to 0.5 mm according to the precision of acquisition sought. The size of the pixel has a typical gross value of $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$, a value which can be reduced by an electronic smoothing process to $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$.

It is to be noted that, as a variation, it is possible to bring about relative displacement between the sensor and the part by moving the part and keeping the sensor still, or to provide scanning by any combination of translatory and rotational movement.

The invention is particularly intended to resolve optical problems, namely that of depth of field, appearing when the sensor is very close to the part, i.e. when the value d/x is high, d (fig. 2) being the active depth of field 7 and x being the minimum distance between the sensor and the object. It will be seen in particular that the value d/x can reach a level well above 1, compared to values in the order of 0.1 to 0.2 in the known processes used to date.

Figs. 3 and 4 show the structure of the light box 100 (fig. 4 shows only the optical members contributing to formation of the beam).

The said light box essentially comprises a laser source 110, for example a laser diode emitting a fine collimated cylindrical beam of a power in the order of 3 mW. The beam strikes a cylindrical lens 120 transforming the thin cylindrical beam into a flat beam (see fig. 4). Means 111 are provided for X and Y co-ordinate adjustment of the exact position of the laser source 110, so that the luminous spot is perfectly centred in the middle of the cylindrical lens 120. The lens itself comprises means for fine control of rotation (in the order of $\pm 5^\circ$ or $\pm 10^\circ$) about its optical axis, so as to control the inclination of the enlarged beam (lamellar beam) to its axis.

The beam is sent via a return mirror 130 towards an optical assembly 140, characteristic of the invention, allowing extension of the optical path of the beam, which process will now be described in detail.

The said assembly 140 firstly comprises an adjustable mirror 141 directing the lamellar beam produced by the previously described members towards a first mirror 142 which is part of a set of two plane parallel mirrors 142, 143. As a result of the well-known phenomenon of "parallel mirrors" a plurality of reflections of the beam will be produced, thus extending the path thereof and at the same time progressively increasing its width, as can be seen in fig. 4 (in this drawing, the dotted line illustrates the centre of the lamellar beam, which for the sake of clarity in the drawing has only been illustrated in full at the beginning and the end of its successive reflections).

After the final reflection, the beam is captured by a mirror 144 which returns it in the direction of a window 150, and at the exit therefrom the beam will strike the part for analysis.

The adjustable mirror 141 allows control of the number of successive reflections, by varying the angle of the first incidence of the beam on the mirror 142. The assembly is usually adjusted so as to obtain at least four successive reflections, this number not being limitative in any way.

The mirror 144 allows adjustment of the perpendicularity of the beam leaving the light box.

It will also be noted that the lamellar beam is generated in a purely static manner, without any member such as a mobile mirror or the like; this has a considerable number of advantages. Any danger to the operator is eliminated (the luminous energy is spread over the width of the beam instead of being concentrated on an intense mobile spot) no fragile mechanical members are required, there is no need to provide synchronisation, and precision is high (no vibrations or disruptions, etc.).

All the mirrors used in the light box are, of course, rectified mirrors of optical quality, and the light box is hermetically sealed so as to prevent any passage of dust or vapour into the path of the beam.

In an example embodiment which has been effectively used, the light box has the dimensions $l \times h \times L^1$ of 70 x 85 x 140, and at a distance $x = 100$ mm from the part, the said light box produces a laser field extending over $d = 150$ mm (with the details of fig. 2). The trapezoidal field 7 of fig. 2 thus has a short side of 65 mm and a long side of 95 mm. The extension of the optical path allows a virtual distance in the order of 1 m, the distance at which the focusing of the laser beam is set. The exact focusing point is positioned approximately in the lower third of the trapezoidal field, so that the thickness of the beam is approximately the same at the beginning and the end of the field. Thus at both the beginning and the end of the field a beam thickness in the order of 0.3 mm is obtained, this thickness reducing to 0.2 mm at the focal point; hence the depth of field is excellent despite the very small physical distance of the sensor and the very broad spread of the laser field.

The detector part of the sensor will now be described.

Fig. 5 is a schematic illustration of the internal structure of each of the two detectors 200, which comprise an entry glass 210 located in direct view of the laser path formed by the intersection of the beam with the object. The image of the path is returned by a set of mirrors 221, 222 towards an analysing block 230 which converts the image into an electronic signal, digitised and processed by a set of circuits designated by the general reference numeral 240 and then sent via a link 250 to a computing system for processing and reconstructing the image. Each of the detectors has, for example, the dimensions $h \times L \times l^2$ of 100 x 100 x 70.

The block 230, shown in greater detail in fig. 6, essentially comprises an objective 231, with appropriate lens, diaphragm and filter, positioned in front of a photoelectric element 232 to analyse the image, such as a CCD

¹ Translator's note - the abbreviation "h" stands for "height" ("hauteur"). The abbreviations l and L must refer to width and length ("largeur" and "longueur") but it is unclear from the original which is which. Therefore the French abbreviations have been retained to avoid error.

² See previous footnote.

(charge coupled device). Control of focusing takes place by translatory displacement of the objective 231 inside its tube 233 (arrow 234).

In accordance with a particular feature of the invention, the CCD (or other image analyser) is mounted to be tiltable about an axis 235 perpendicular to the optical axis Δ ; the tilting movement is indicated by the arrow 236.

As fig. 7 shows, the tilting device compensates for the faults in focusing due to the proximity of the sensor and the object. Two points A and B of an object, located at the same level in relation to the horizontal, will in fact produce images at A' and B' respectively, the more distant point A producing an image in front of the normal focal plane P of the sensor (i.e. the focal plane perpendicular to the optical axis Δ) and the closer point producing an image behind the said focal plane.

The tilting device is intended precisely to overcome this anomaly by bringing the CCD into a plane P' containing the points A' and B'. The effect of this compensation is to increase the overall depth of field of the optical system, since the corresponding focusing fault is being remedied.

In the case of an inclination α (figs. 1 and 7) of the optical axis, of 45° in relation to the vertical, the optimum extent of tilting β is in the order of 7° , this value being dependent on the lens, the size of the CCD and the dimension of the field, and various other parameters.

Figs. 8 to 10 show a further aspect of the invention relating to the analysis of the signal delivered by the CCD 232.

Fig. 8 is a schematised illustration of the (analogue) video signal V(t) delivered for each scanning line of the CCD, with a signal between two synchronising pulses, the amplitude of the said signal varying as a function of the luminous energy received; the signal represents the path of the laser beam.

The purpose of the circuit is to determine the position of the laser path in relation to the beginning of the line, i.e. the position of the energy peak corresponding to the path (or, in other words, the value σ representing the time which has elapsed since the synchronising pulse of the video signal

line). The difficulty here is that in practice, the path does not appear in the form of a sudden peak but is spread to a certain extent, because of the obliquity of the incidence of the beam in relation to the part, diffraction phenomena, interference of various kinds etc.

Several methods have been proposed for unequivocal determination of the corresponding position of the path.

For example, a threshold T can be determined, and it can be decided that the position of the path will correspond to the instant half-way between the two instants at which the threshold is crossed, in one direction and the other. However, this method pre-supposes that the spread of the signal is approximately symmetrical, and is also difficult to carry out because of the highly variable nature of the threshold to be provided.

Another method consists of differentiating the video signal and deciding that the position of the path corresponds to the sign inversion of the derived signal. This method, as is the case with the previous method, has the disadvantage of pre-supposing that the spread of the signal is substantially symmetrical, and has the additional disadvantage inherent in any processing of signals which involves differentiation, namely that the noise effects and various types of interference will be amplified.

The invention proposes a different method of proceeding, essentially consisting of integrating the video signal and deciding that the position of the path corresponds to the centre of energy of the video signal, i.e. the location for which (see fig. 10a) the areas S_1 and S_2 are equal.

The principal advantage of this method is that it offers an excellent level of immunity to noise, because of the integration.

Moreover, it can be carried out by a very simple analogue electronic circuit, as shown in fig. 9.

The said circuit substantially comprises an integration stage 241 receiving at its input the video signal $V(t)$ (line (a) of the timing diagram in fig. 10) and delivering at its output an integrated signal $S(t) = \int V(t)$ (the integrator is reset to zero by the synchronising pulse of the video signal line).

The said signal $S(t)$ is applied to two separate branches 242 and 243. The branch 242 comprises a simple voltage divider delivering at its output a signal $S(t)/2$ of half the amplitude of the signal $S(t)$. The branch 243 comprises a delay line, preferably a programmable delay line, delaying the signal $S(t)$ by a period τ , the signal thus emerging as $S(t-\tau)$. The two signals obtained in this manner, respectively shown on the lines (b) and (c) of the timing diagram in fig. 10, are then applied to the two respective inputs of a comparator 244 which will then switch at the moment (to within τ) when $S(t)/2 = S(t-\tau)$, i.e. the moment at which the areas S_1 and S_2 are equal. The line (d) of the timing diagram in fig. 10 shows the signal $\Sigma(t)$ at the exit from the comparator 244.

The delay τ of the delay line 243 is selected so as to be at least equal to the broadest video signal representative of the laser path which is likely to be encountered, i.e. it must be selected according to the maximum predictable spread of the path. Generally, a value of 50 to 100 ns is satisfactory.

It is also possible to carry out the process in digital form, as will now be described with reference to figs. 11 and 12.

In this case the analogue video signal $V(t)$, an example of which is given in fig. 11a, is firstly digitised by an analogue/digital converter 245, which can be incorporated either in the sensor (allowing greater immunity to noise) or in the camera itself, in the case of a component with a direct digital output.

The digital signal obtained, $B_i(t)$ shown in fig. 11b, is represented for each video line in the form of a series of successive samples of the value B_i , digitisation of this value generally taking place over 8 bits. The first sample which is not zero is the P^{th} , and the last is the Q^{th} . The processing consists of discovering which is the M^{th} sample corresponding to the centre of energy of the video signal (i.e. the point at which the areas S_1 and S_2 , after digitisation, are equal) and discovering the position of the said centre of energy within the M^{th} sample, i.e. the value m , is between 0 and 100%, shown in fig. 11b.

The said value m is determined in the following manner.

The total energy Σ , i.e. the surface of the hatched areas I to IV on fig. 11b, is:

$$\Sigma = \sum_P^Q B_i.$$

If the centre of energy is located in the sample on row M (where $P \leq M \leq Q$) then the following relationship exists, expressing that the surface of the areas I + II is equal to the surface of the areas III + IV [sic]:

$$\sum_P^{M-1} B_i + m.B_M = (1-m).B_M + \sum_{M+1}^Q B_i,$$

which in other terms could be written:

$$m.B_M = \Sigma/2 - \sum_P^{M-1} B_i. \quad (1)$$

To this end, the digital signal B_i leaving the converter 245 is applied to an accumulating register 241 (acting as the integration stage which has the same reference numeral in the analogue embodiment); the accumulator being a real-time adder wherein the output value will be an energy signal Σ increasing over time (in a similar manner to the signal illustrated in fig. 10b in the analogue version). It will be noted that the sequence of different steps only begins upon receipt of a sample which is not nil, i.e. the P^{th} sample, the appearance of which at the output of the converter 245 initialises and triggers a sequencing circuit 246, ensuring temporal control of the various digital stages of the circuit.

The energy signal Σ at the output of the accumulator 241 is applied, on the one hand, to a divider 242 to divide it in half and give a signal $\Sigma/2$ (in this digital variation, division by two is obtained simply by shifting one bit to the right, hence by simple appropriate wiring), and, on the other hand, to a shift register 243 acting as a delay stage. The size of the said shift

register is selected so as to be at least equal to the greatest number of pixels of the video path which is likely to be encountered, so that it will never be saturated.

The outputs of the divider 242 and the register 243 are applied to two inputs of a subtracter circuit 244 acting as a comparator; in fact, the result of the subtraction will be negative once the following is produced:

$$m.B_M > \Sigma/2 - \sum_{P}^{M-1} B_i,$$

i.e. once the energy centre point has been passed.

In other words, it is known at this instant (to within the delay introduced by the register 243) that the position reached is precisely on the row M sample.

This switching is detected by a status bit S, and the change in value thereof indicates that at the output from the subtracter 244 the following value is available:

$$\Sigma/2 - \sum_{P}^{M-1} B_i,$$

i.e. the value $m.B_M$ from equation (1).

The value B_M is known from elsewhere, for example at the output from a shift register 248 of the same size as the register 243 and receiving the successive samples B_i at its input.

Instead of a digital division procedure to obtain the value m sought from the product $m.B_M$ (the other value M sought, namely the row of the sample containing the energy centre point, being supplied directly by the counting logic in the sequence controller 246), which is a solution which would be difficult and costly to implement in real time, it is preferable to

use a memory 247 of 64 Ko³ containing the 256 possible values of m (each value being coded on an eight-bit byte) as a function of $m.B_M$ on the one hand, and B_M on the other hand. These two latter pieces of information, each of one eight-bit byte, are applied to the input points A_1 , A_2 of the memory 247.

Upon switching of the circuit 244, the value $m.B_M$ exiting from the circuit is applied to the input A_1 , and the value B_M is applied to the input A_2 ; the value m sought is then obtained immediately and directly at the data output D.

As can be seen, this particular form of implementation of the circuit makes it possible to calculate in real time the position of the energy centre point of the video signal, with very high precision (approximately a tenth of a pixel of resolution, at least).

³ Translator's note - it is suspected that the "o" stands for "octet" and the correct translation is "Kbit". However, this was not confirmed by any reference work.

Claims

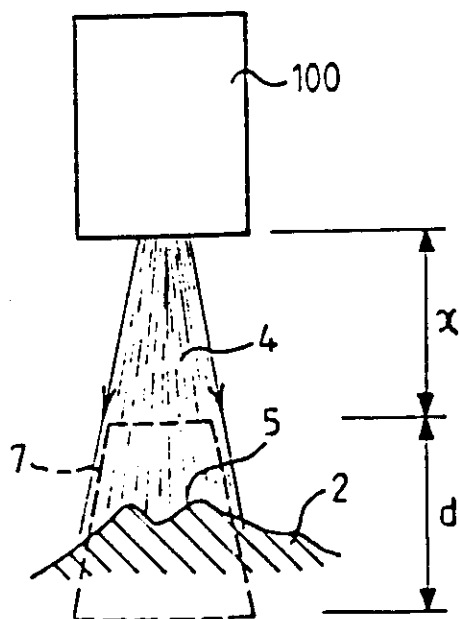
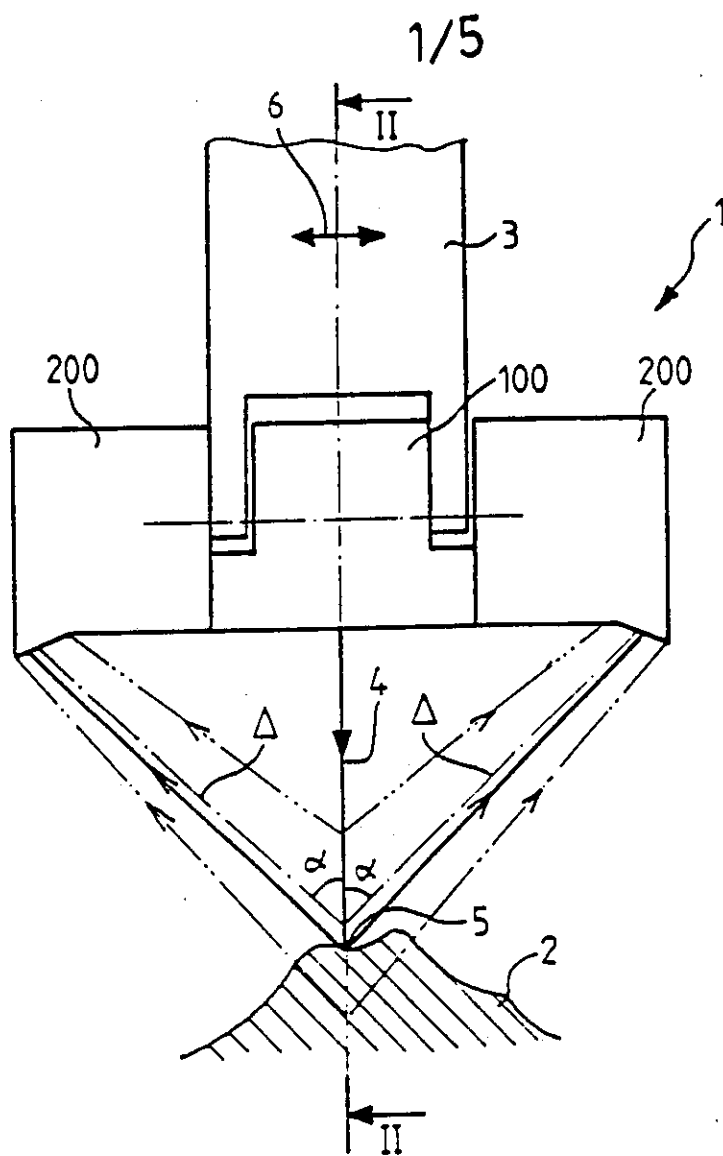
1. An optical sensor for three-dimensional shapes, comprising a laser source producing a plane lamellar beam (4) illuminating the surface of an object (2) in such a manner as to produce on the said object a luminous incident curved path (5) analysed by at least one video camera producing information converted into digital data representative of pixel co-ordinates, **characterised by** a light box (100) comprising, in the same casing positioned above the object to be analysed and at a short distance therefrom:

- the said laser source (110), producing a collimated rectilinear beam;
- optical means (120) to convert the said rectilinear beam into a plane lamellar beam; and
- means for extending the optical path of the beam (140) comprising two fixed plane mirrors (142, 143) arranged opposite one another in such a manner as to produce a plurality of reflections between an entry point (141) and an exit point (144) of the beam;

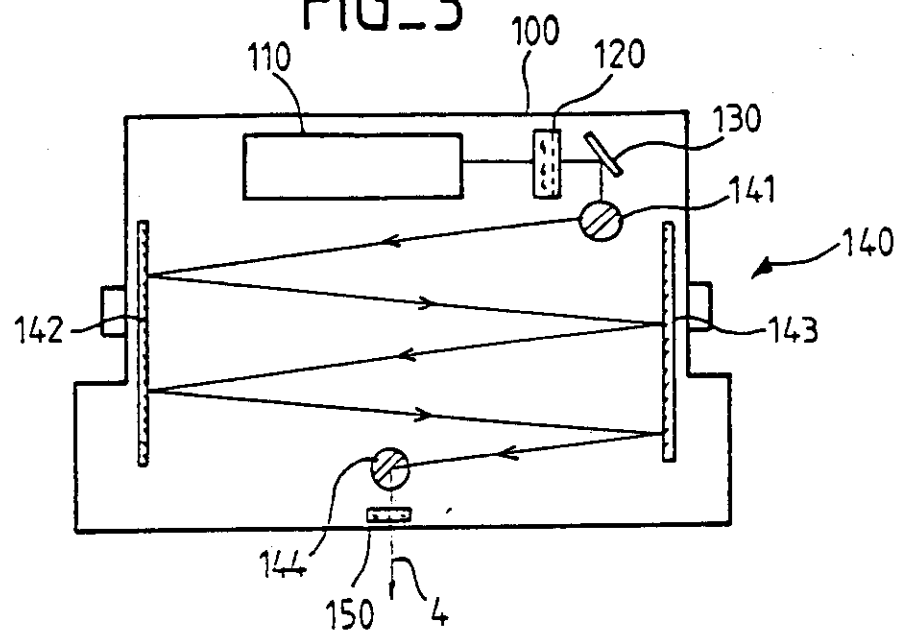
in such a manner as to compensate for the low physical distance between the casing and the object, by a virtual optical distance, and thus correspondingly to increase the depth of field of the effective region (7) of the plane lamellar beam leaving the casing.

2. A sensor in accordance with claim 1, wherein the entry and exit points (141, 144) comprise optical means for controlling the incidence of the beam, in such a manner as to adjust the number of reflections between the two opposite mirrors.

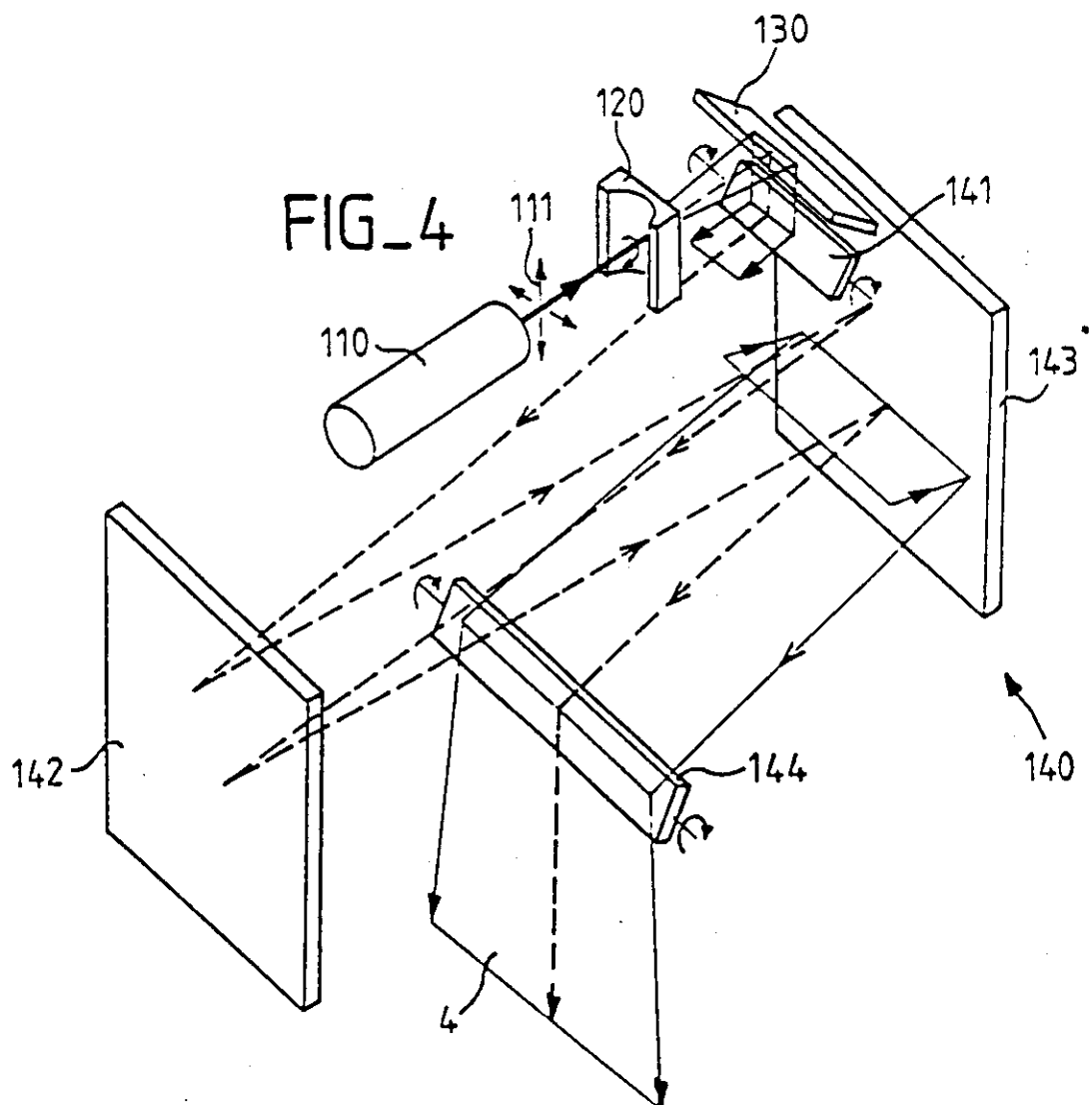
3. A sensor in accordance with claim 1, wherein the optical means (120) to convert the rectilinear beam into a plane lamellar beam are static means.
4. A sensor in accordance with claim 1, additionally comprising at least one detector block (200) abutting the light box and provided with an image-analysing photoelectric element (232) and means forming an objective (231) positioned in front of the said image-analysing element.
5. A sensor in accordance with claim 4, additionally comprising means for relative tilting of the image-analysing element in relation to the means forming the objective.
6. A sensor in accordance with claim 4, additionally comprising an electronic circuit to extract the information representing the position of the laser beam path on each line of the image delivered by the image-analysing element, the said circuit comprising:
 - an integration stage (241) receiving at the input an electric signal representative of the intensity of light received, varying according to the position being considered on the analysed line, and delivering to the output an increasing signal representative of the cumulative luminous energy received;
 - a dividing stage (242) receiving at the input the energy signal delivered by the integration stage;
 - a delay stage (243) receiving at the input the energy signal delivered by the integration stage; and
 - a comparison stage (244) receiving at each of its inputs the respective output signals from the dividing stage and the delay stage, the switching of the said comparison stage defining the position of the centre of the laser beam path, during scanning of the line of the image.

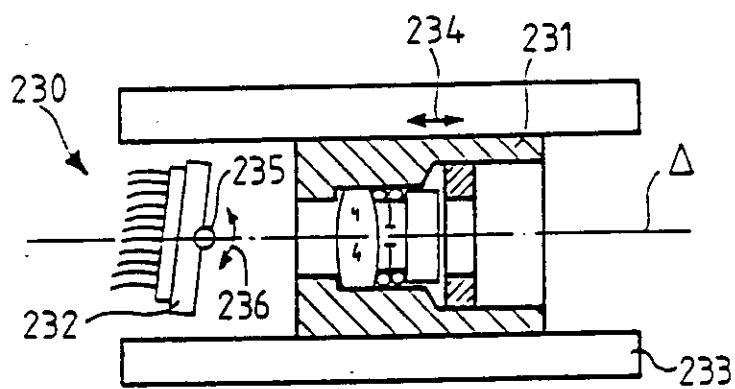
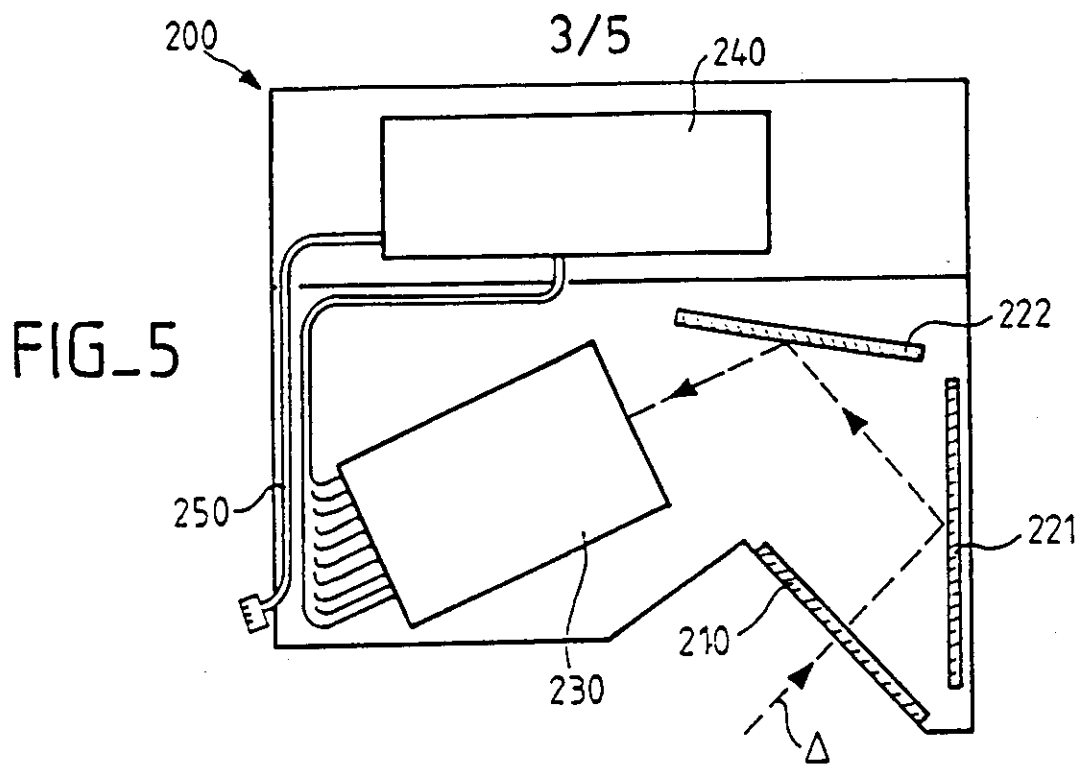


FIG_3

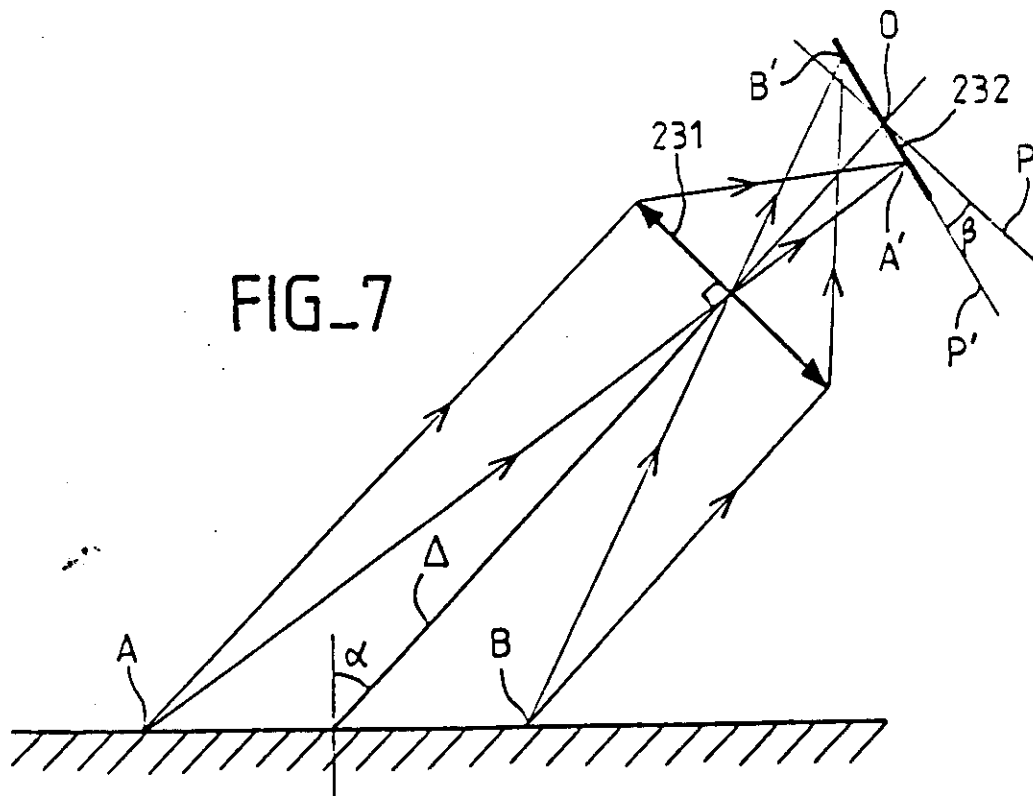


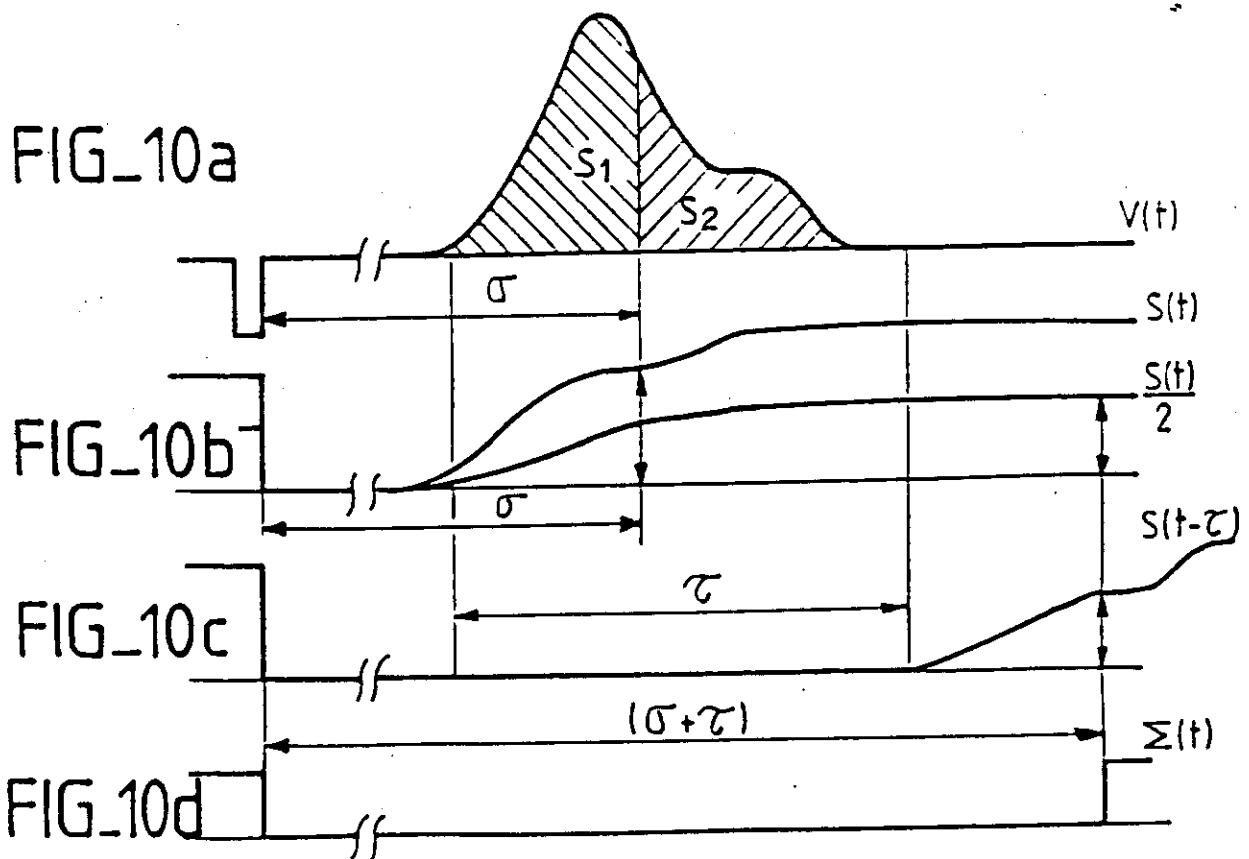
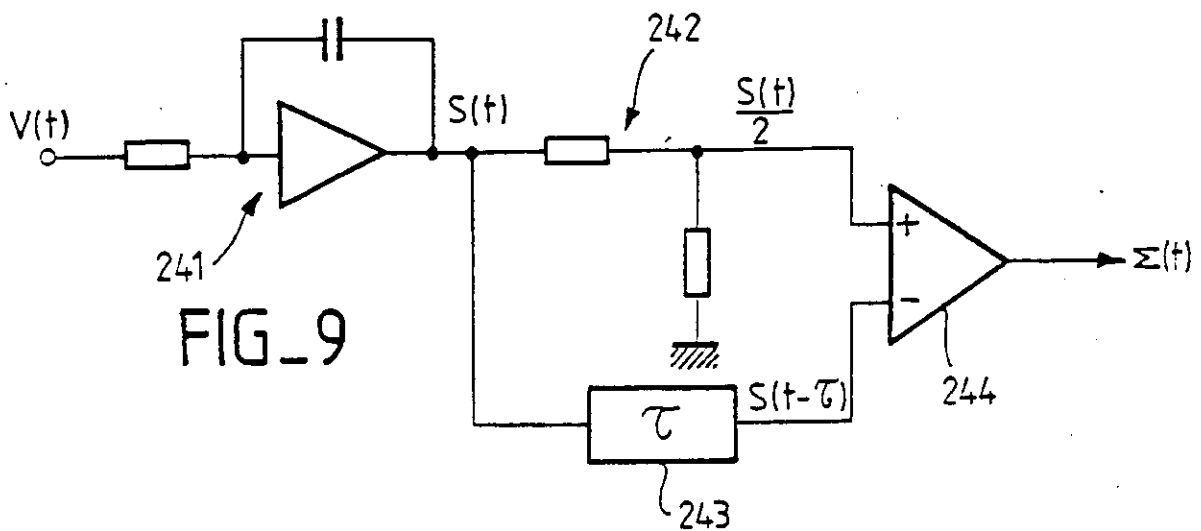
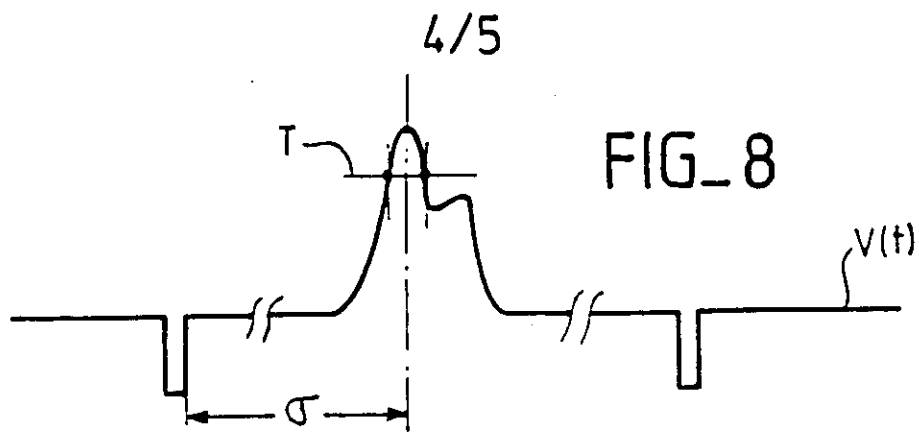
FIG_4



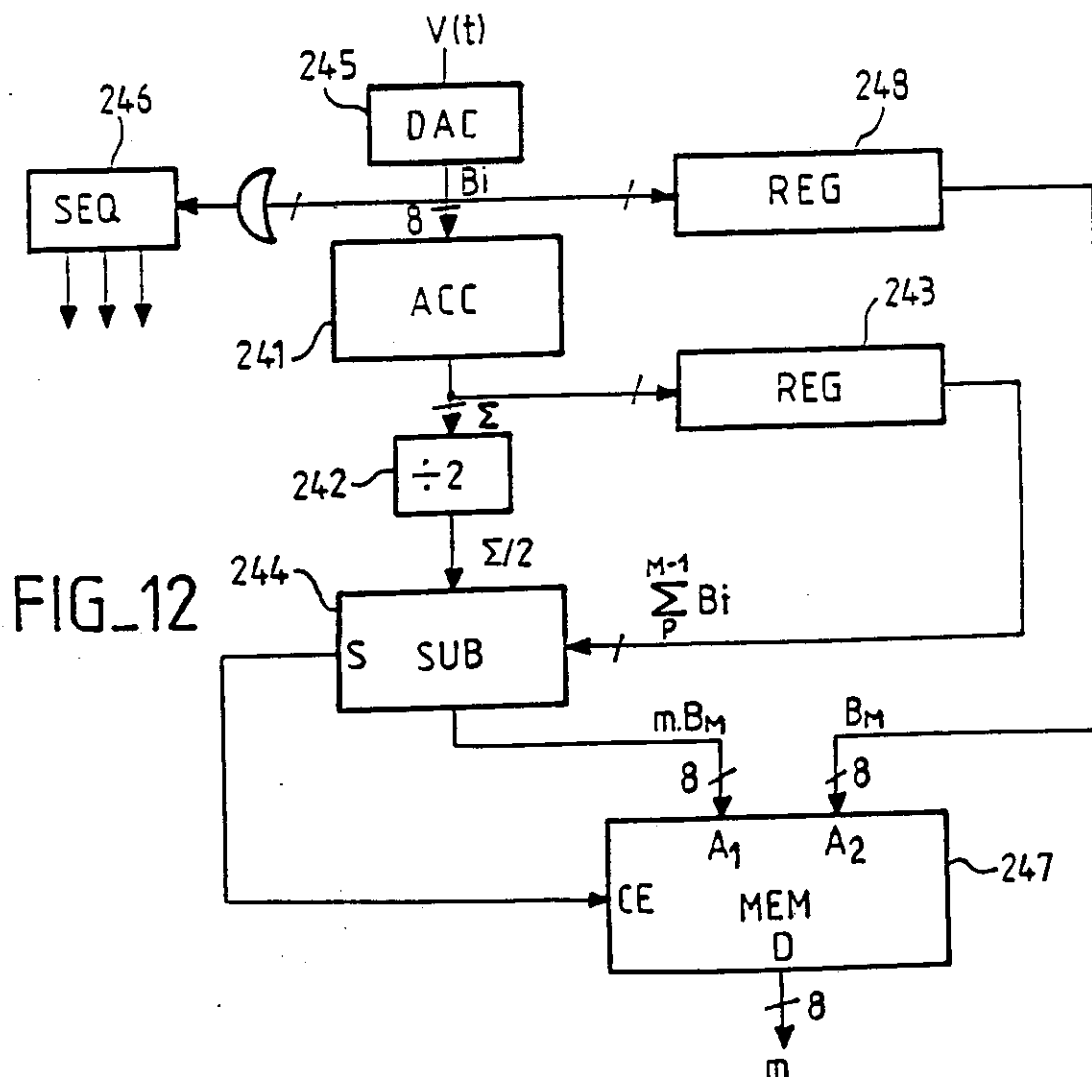
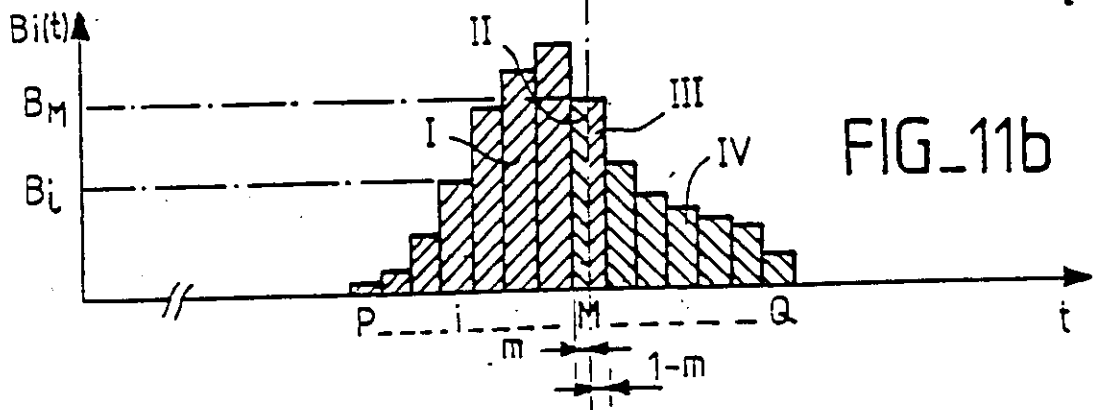
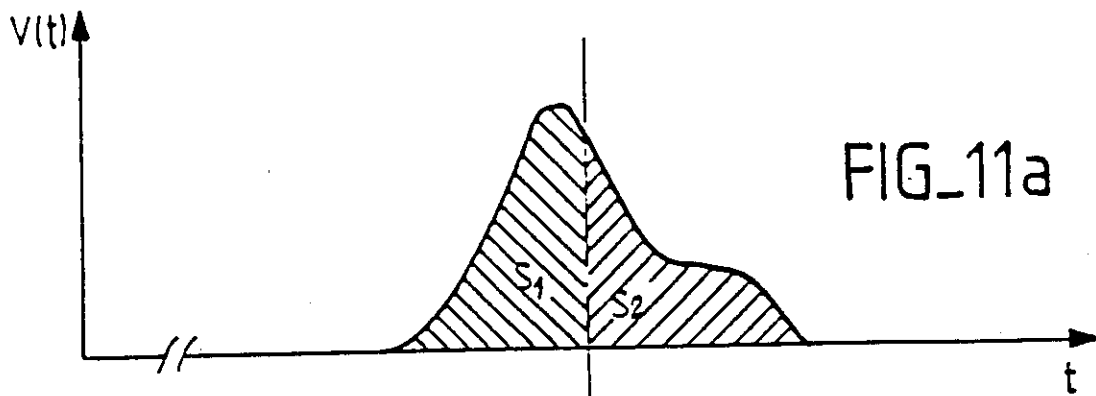


FIG_6





5/5



REGISTER ENTRY FOR EP0550300 ✓

European Application No EP92403280.8 filing date 04.12.1992

Application in French

Priority claimed:

30.12.1991 in France - doc: 9116305

Designated States BE DE DK ES GB GR IE IT LU NL PT

Title COMPACT OPTICAL SENSOR OF HIGH RESOLUTION FOR ANALYSING
THREE-DIMENSIONAL SHAPES.

Applicant/Proprietor

SA KREON INDUSTRIE, Rue Nicolas Appert, F-87021 Limoges, France

[ADP No. 59656116002]

Inventors

ERIC COSNARD, Barbe d'Or, 4107, F-31180 La Peyrouse-Fossat, France

[ADP No. 61032645001]

JAN STEUPERAERT, Les régourdes, F-31460 Le Faget, France

[ADP No. 61032652001]

Classified to

G1A

G01B

Address for Service

MARKS & CLERK, 57-60 Lincoln's Inn Fields, LONDON, WC2A 3LS, United

Kingdom

[ADP No. 00000018001]

EPO Representative

CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain 30, rue la Boétie, F-75008 Paris,
France

[ADP No. 50216829001]

Publication No EP0550300 dated 07.07.1993 and granted by EPO 08.03.1995.

Publication in French

Examination requested 26.11.1993

Patent Granted with effect from 08.03.1995 (Section 25(1)) with title COMPACT
OPTICAL SENSOR OF HIGH RESOLUTION FOR ANALYSING THREE-DIMENSIONAL SHAPES..
Translation filed 06.04.1995

21.07.1993 Translation of claims filed under S78(7) on 16.07.1993.

Entry Type 10.1 Staff ID. AC2 Auth ID. F56

21.07.1993 FILE RAISED.

Entry Type 10.1 Staff ID. AC2 Auth ID. AO

21.07.1993 MARKS & CLERK, 57-60 Lincoln's Inn Fields, LONDON, WC2A 3LS, United
Kingdom

[ADP No. 00000018001]

registered as address for service

Entry Type 8.11 Staff ID. AC2 Auth ID. F56

03.02.1995 Notification from EPO of change of EPO Representative details from
CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain 30, rue la Boétie, F-75008
Paris, France [ADP No. 50216829001]
to
CLAUDE RODHAIN, Cabinet Claude Rodhain S.A. 3, rue Moncey, F-75009
Paris, France [ADP No. 50216829001]
Entry Type 25.14 Staff ID. RD06 Auth ID. EPT

**** END OF REGISTER ENTRY ****

OA80-01
EP

OPTICS - PATENTS

05/06/95 14:57:41
PAGE: 1

RENEWAL DETAILS

PUBLICATION NUMBER EP0550300

PROPRIETOR(S)

SA KREON INDUSTRIE, Rue Nicolas Appert, F-87021 Limoges, France

DATE FILED 04.12.1992

DATE GRANTED 08.03.1995

DATE NEXT RENEWAL DUE 04.12.1996

DATE NOT IN FORCE

DATE OF LAST RENEWAL

YEAR OF LAST RENEWAL 00

STATUS PATENT IN FORCE

**** END OF REPORT ****