

⑭ DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑮ Date de dépôt : 13.09.91.

⑯ Priorité : 14.09.90 DE 4029215.

⑰ Date de la mise à disposition du public de la demande : 27.03.92 Bulletin 92/13.

⑱ Liste des documents cités dans le rapport de recherche : *Le rapport de recherche n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

⑲ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑴ Demandeur(s) : DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT für Luft- und Raumfahrt e.V. — DE.

⑵ Inventeur(s) : Stieler Bernhard.

⑶ Titulaire(s) :

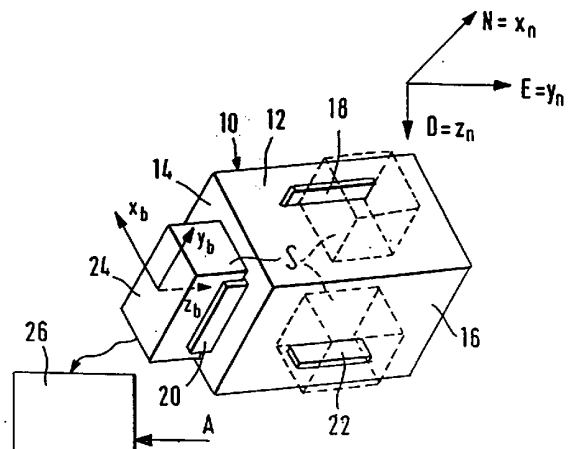
⑷ Mandataire : Cabinet Bonnet Thirion.

⑸ Procédé pour le mesurage d'angles, de trajectoires, de contours et d'anomalies de gravité au moyen de gyroscopes et de systèmes inertiels.

⑹ La présente invention permet le calibrage des incertitudes de mesurage en fonction du temps de gyroscopes et de systèmes inertiels à partir des différences de mesures d'angles et/ou de vitesses et/ou de positions, qui sont effectuées par rapport à des directions de référence inconnues ou modifiées dans le temps et/ou à des points fixes (en bref: état des mesures) et réitérées à intervalles dans le temps. L'existence d'une référence précise n'est pas nécessaire. Le calibrage, comme complément du processus de mesurage, permet la correction des incertitudes de mesurage.

Pour le mesurage d'angles dans l'espace il est prévu un paquet de mesurage gyroscopique triaxial (24) et un ordinateur (26) avec possibilité d'introduction ou de mise en mémoire automatique de grandeurs de référence A.

Pour le mesurage de contours, il faut en outre mettre en mémoire et mesurer le trajet ou le mesurer à l'aide de la mesure de l'accélération d'un système inertiel intégral.



FR 2 667 143 - A1



La présente invention concerne un procédé de mesurage d'angles au moyen de gyroscopes où à des intervalles temporels on procède par rapport à des éléments de référence égaux à au moins deux mesures ou l'on exploite dans un ordinateur sur la base de modèles pour la relation entre les mesures et les erreurs de système en vue d'une estimation optimale des erreurs de système et l'on effectue sur la base ainsi élaborée une correction des mesures.

Un tel procédé pour la mesure bidimensionnelle d'angles et de caractéristique d'angle est l'objet d'une demande de brevet allemand antérieure de référence P 40 15 800.4 du 14 mai 1990.

Sur le plan technique c'est un problème important et difficile de mesurer dans l'espace des angles, des trajectoires, des contours et des processus de mouvements comme les anomalies de gravité : c'est ce qui ressort des exemples qui vont suivre.

Dans les constructions en superstructure, lors de la construction de routes ou de voies ferrées, les déclivités en fonction des rayons de virage sont à mesurer ; un problème analogue se pose dans l'exploitation souterraine lors du mesurage et du percement de tunnels, puits ou canalisations. Pour les sondages profonds dans les entrailles de la terre, le trajet de tiges de sondage est à déterminer et à commander. Des caractéristiques élastiques de déformation, c'est-à-dire des modifications d'angles et de positions en fonction de charges extérieures sont à enregistrer pour la construction automobile et aéronautique. Les forces aérodynamiques et les moments en fonction de l'angle de soufflage sont à déterminer dans la technique du canal aérodynamique. S'agissant de l'expérimentation d'avions et de véhicules automobiles, les déroulements de mouvements doivent être enregistrés, c'est-à-dire l'évolution dans le temps de la position, de la vitesse, du cap et de la situation de l'objet de l'expérimentation. En géodésie, partant d'un point de référence mesuré astronomiquement une zone de terrain est déterminée par mesurages et reproduite sous forme de cartes. En définitive, lors de ces mesurages, de nombreuses anomalies de gravité présentent

de l'intérêt, puisque la verticale et ses déviations ont par ailleurs des répercussions sur les mesures astronomiques. Des anomalies de gravité renseignent également sur les gisements possibles de matières premières.

5 On utilise déjà dans ce contexte des instruments gyroscopiques et des systèmes inertiels intégraux (INS). Du fait de l'intégration dans le temps des signaux de gyroscope et d'accéléromètre en vue de la détermination de l'angle et de la position, des dérives de système chronologiquement crois-
10 santes se font jour par suite des dérives des capteurs. Afin de les maintenir faibles, des systèmes de haute qualité, coûteux par conséquent, et/ou des procédés de calibrage ou support sont utilisés selon l'état de la technique.

Avant ou après le processus propre de mesures, des procédés de calibrage sont mis à exécution, puisque l'on dispose
15 alors de références externes connues. En utilisant des gyroscopes ou des systèmes inertiels intégraux, les procédés de calibrage présentent un inconvénient dans la mesure où ils nécessitent d'y consacrer un temps important. La détermination des paramètres d'un modèle d'erreur résulte d'un processus chronologique d'intégration et la précision du calibrage à laquelle l'on peut parvenir augmente avec la durée. De tels procédés sont connus pour le calibrage des gyroscopes d'un satellite stabilisé triaxialement par exemple
20 (cf. DE 37 34 941 C2) ou pour l'initialisation et/ou le recalibrage d'un système à répétition de navigation inertielle (cf. DE 34 45 463 A1). Un autre inconvénient du procédé de calibrage réside en ce que la justesse dans le cadre de mesures ultérieures est alors limitée, lorsque l'on utilise
30 des capteurs, dont les paramètres d'erreur dépendent du temps. Les procédés de calibrage citée partent d'une stabilité déterminée de ces valeurs pendant le processus de mesures. Les procédés de mesure comportant des gyroscopes, utilisés aujourd'hui déjà dans les sondages profonds dans les entrailles
35 de la terre, sont soumis à cet inconvénient. Ici, les conditions de température et par conséquent de dérive sont extrêmement rigoureuses pour les gyroscopes lors du processus de mesures et les données de calibrage fournies au début

et à la fin des mesures ne sont pas représentatives pour la totalité du mesurage.

L'utilisation de procédés dits de support englobe, selon l'état de la technique (Gyroscopic Instruments and their
5 Application to Flight Testing, AGARDograph N° 160, Vol.15, Septembre 1982, Chapitre 8) le traitement de références externes connues durant le processus de mesures avec utilisation d'algorithmes mathématiques particuliers (filtre de Kalman par exemple). Par rapport aux procédés de calibrage
10 mentionnés ci-dessus, ils peuvent être encore utilisés avec succès dans une plus large mesure, lorsque l'on emploie des capteurs de moindre qualité, c'est-à-dire comportant des paramètres d'erreurs instables. L'inconvénient de l'utilisation de ces procédés réside naturellement dans la création
15 de ces grandeurs externes de mesure, ce qui, en règle générale, est liée à une dépense en appareils ou se situe en dehors de toute possibilité. Tandis que l'on utilise, lors des essais en vol, des signaux provenant de récepteurs gonio pour le support de positions de systèmes inertiels, l'on ne peut
20 en général se reporter à aucune référence dans les mesures de forages.

Pour la mesure du parcours axial de canalisations de transport de produits contrôlés, il est connu de disposer dans les inserts mis en oeuvre pour séparer entre elles des
25 charges différentes, de la manière connue pour les aéronefs, un système inertiel de navigation avec trois gyroscopes, trois accéléromètres et un ordinateur avec base temporelle. Avec le système inertiel de navigation on mesure et on enregistre le parcours axial de la canalisation comme la trajectoire d'un avion dans l'espace. A l'appui de ce processus
30 on utilise les anomalies magnétiques dont l'emplacement est connu dans la canalisation ; en particulier les soudures annulaires aux jonctions. Les mesures effectuées sur un parcours ne sont exécutées qu'une seule fois (cf. brevet US
35 4 799 391). Dans les mesures géodésiques basées sur un système inertiel (Géodésie inertielle), l'on utilise pour support des points de position particuliers et en outre le "zero velocity

updating (ZUPT)", le véhicule de mesurage étant arrêté et la vitesse étant traitée comme nulle dans l'ordinateur. Ce dernier procédé est certes une méthode support facile à réaliser, mais il exige pour l'ensemble du processus de mesurage
5 une dépense élevée en temps et il est limité quant à sa justesse dans la détermination ultérieure de positions puisque le support n'englobe aucune mesure extérieure de position. Des informations support pour la détermination d'anomalies de gravité dans une zone pilote à l'aide d'un INS
10 entraînent des mesures multiples et coûteuses en temps pour des positions déterminées avant la campagne de mesurage par gravimétrie proprement dite et par conséquent ne se présentent que rarement.

La présente invention a pour objet un procédé pour la
15 mesure d'angles spatiaux en au moins deux emplacements différents entre eux de manière reproductible par la mise en oeuvre de gyroscopes et d'un agencement pour l'affichage de la détermination de position de chaque emplacement de mesure, ce procédé devait permettre d'obtenir indépendamment de l'in-
20 tervalle de temps de cette mesure, des résultats de mesure de grande précision sans nécessiter la mise en oeuvre de gyroscopes et/ou de moyens de calibrage ou d'appui très onéreux.

La présente invention propose un procédé de mesure et
25 d'évaluation à employer sur les instruments gyroscopiques ou les systèmes inertiels, en vue de déterminer des angles, des trajectoires, des contours et des déroulements de mouvements dans l'espace, ainsi que des anomalies de gravité.

Le procédé selon l'invention est caractérisé essentiel-
30 lement en ce qu'avec les gyroscopes, sont, par rapport à des directions inconnues et modifiées dans le temps, effectuées des mesures angulaires spatiales, qui sont répétées à des intervalles temporels t_{j1} et t_{j2} pour des références identiques de direction ($j =$ direction de la mesure répétée, 1 et
35 2 = instants), en ce que pour les mesures répétées vis-à-vis des directions identiques de référence j , les différences \underline{y}_j des mesures de gyroscope sont établies dans l'ordinateur par traitement ultérieur des données, en ce que les modèles

pour l'élaboration dans le temps des différences d'erreurs de système incluant les erreurs de capteurs sont calculés dans l'ordinateur pour l'instant 0 du début du mesurage en avançant dans le temps et par des égalités comportant les différences de mesurage \underline{y}_j , telles que des égalités de mesurage conformes à :

$$\begin{aligned} y_{j,v} &= \underline{H} \left(\underline{\Phi}(t_{j2},0) - \underline{\Phi}(t_{j1},0) \right) \underline{x} + \underline{v} \\ y_{j,r} &= \underline{H} \left(\underline{\Phi}(t_{j2},T) - \underline{\Phi}(t_{j1},T) \right) \underline{x} + \underline{v} \end{aligned}$$

avec les index v et r pour "en avant" et "en arrière" dans le temps et $\underline{H} = \begin{pmatrix} \underline{I} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix}$ = matrice de mesurage, $\underline{\Phi}(t,0)$ matrice de transition du point 0 vers t, $\underline{x} = (\underline{\xi}^T \underline{D}^T \underline{R}^T)^T$ = vecteur d'erreur de système, avec $\underline{\xi}$ = vecteur de dérive angulaire, \underline{D} = vecteur de dérive de gyroscope et \underline{R} = vecteur de modification dans le temps de dérive de gyroscope et \underline{v} = souffle de mesurage, servent à l'estimation optimale des erreurs de système, en ce que de là, deux fonctions de temps des erreurs de système estimées de manière optimale $\hat{\underline{x}}_v$ et $\hat{\underline{x}}_r$ sont, en partant du début et de la fin du mesurage, calculées comme bases pour une fonction de temps $\hat{\underline{x}}$ commune obtenue par moyenne pondérée, une correction des mesures étant effectuée à l'aide de cette fonction de temps de l'erreur de système. De préférence, on choisit pour caractériser des directions identiques de référence des grandeurs de référence qui sont dans un rapport physique indiscutable avec les directions de référence.

Les caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre de plusieurs formes de réalisation, en référence aux dessins annexés dans lesquels :

La figure 1 montre le procédé utilisé pour le mesurage d'angles dans l'espace entre des surfaces de référence.

La figure 2 montre le procédé utilisé pour le mesurage d'angles le long d'un parcours dans l'espace avec guidage par rail du paquet de mesurage gyroscopique.

La figure 3 montre le procédé utilisé pour le mesurage sans contact d'angles dans l'espace.

La figure 4 montre le procédé utilisé pour le mesurage de caractéristiques angulaires dans l'espace, c'est-à-dire

la déformation dans l'espace d'éléments d'une construction en fonction de charges.

La figure 5 montre le procédé utilisé pour le mesurage de contours spatiaux avec marquage numérique des distances.

5 La figure 6 montre le procédé utilisé pour le mesurage de contours spatiaux avec mesurage de la distance au moyen d'un capteur de déplacement.

La figure 7 montre le procédé utilisé pour le mesurage sans contact de contours spatiaux.

10 La figure 8 montre le procédé utilisé pour le mesurage de trajectoires et de déroulements de mouvements.

La figure 9 montre le procédé utilisé pour le mesurage de trajectoires et d'anomalies de gravité.

15 Les figures 10 à 12 présentent le schéma fonctionnel des programmes pour les différents cas d'utilisation, à savoir

la figure 10 est un organigramme du programme de calcul pour le mesurage précis d'angles dans l'espace à partir de données gyroscopiques,

20 la figure 11 est relative au programme de calcul pour le mesurage précis de contours dans l'espace à partir de données gyroscopiques et de mesurage de distances,

la figure 12 est relative au programme de calcul pour le mesurage précis de contours, trajectoires, angles, déroulements de mouvements et anomalies de gravité dans l'espace
25 à partir des données d'un système inertiel.

Forme de réalisation N° 1

S'agissant de mesurer des angles entre des directions de référence dans l'espace ainsi que des caractéristiques spatiales d'angles (variation des déformations spatiales angulaires d'éléments d'un tout chargés en fonction des forces
30 ou des moments, qui y sont appliqués ou bien variation des forces ou des moments aérodynamiques agissant sur un modèle en fonction de l'angle spatial de soufflage lors de mesures aérodynamiques), seul un paquet de mesurage gyroscopique
35 triaxial S comportant des surfaces d'arrêt ou un guidage angulaire est nécessaire ainsi que l'enregistrement dans l'ordinateur de grandeurs de référence A. Ces dernières sont, par exemple, des grandeurs de référence introduites à la main

pour les positions de mesures ou des marquages de celles-ci mises automatiquement en mémoire (figures 1 et 2). Pour les mesures d'angles sans contact, il est possible d'envisager aussi le mesurage de points d'ajustement au moyen d'un
5 appareil optique de mesure d'angles (autocollimateur, caméra de mesurage) relié de manière fixe au paquet de mesurage gyroscopique et d'une évaluation correspondante du mesurage de l'angle relatif entre le paquet de mesurage gyroscopique et une surface de référence (figure 3). Par conséquent, par
10 rapport à l'état de la technique, l'on peut renoncer à la base fixe, qui lui est indispensable. Pour les mesures des caractéristiques, les forces ou les moments qui interviennent sont les grandeurs de référence (figure 4). Des mesures dans le plan de référence sont décrites dans le document
15 EU-91107567.9, auquel il est fait référence. L'objet de la présente invention est la réalisation de mesures spatiales et aussi de mesures sans contact.

Les figures 1 à 4 décrivent avec d'autres détails les exemples de réalisation mentionnés.

20 La figure 1 représente schématiquement un corps 10, qui peut avoir une forme quelconque et qui présente trois emplacements de mesurage 1, 2 et 3 comportant des surfaces de mesurage 12, 14 et 16, sur chacune desquelles est placée une butée 18, 20 et 22. Il est prévu pour effectuer les mesures un
25 appareil de mesurage 24 comportant trois gyroscopes d'axes x_b , y_b et z_b . L'angle spatial de chaque emplacement de mesurage 1, 2, 3 du corps 10 est celui des coordonnées x_b , y_b et z_b par rapport aux coordonnées liées à la terre $N = x_n$, $E = y_n$ et $D = z_n$. Pour effectuer la mesure, le paquet de mesurage gyroscopique est positionné à tour de rôle au moins
30 deux fois sur chacune des trois surfaces de mesurage au contact de la butée correspondante. L'appareil de mesurage est représenté au contact de la surface de mesurage 14. Sa position contre les autres surfaces de mesurage mentionnées est
35 marquée en traits discontinus. Les valeurs respectives des mesures gyroscopiques, comme dans toutes les configurations, sont envoyées à un ordinateur 26 comportant une base de temps. En outre, une grandeur de référence A est fournie à l'ordina-

teur pour chaque mesure. Cette grandeur de référence est, dans la configuration de la figure 1 par exemple, la caractéristique des emplacements de mesurages 1 à 3.

L'exemple de réalisation de la figure 2 représente un agencement pour le mesurage du trajet d'un forage 28. Dans celui-ci se trouve un guidage 30 comportant par exemple trois rails de guidage, dont deux sont représentés dans le dessin annexé. L'appareil de mesurage 32 comporte à nouveau trois gyroscopes placés dans les trois coordonnées spatiales. Le guidage 30 peut être pourvu de marquages 1-6 etc.. Ces derniers peuvent être détectables optiquement. L'appareil de mesurage 32 est relié à l'ordinateur 38 par un câble 36. Dans cet exemple de réalisation, les positions de mesures respectives sont les grandeurs de référence. Celles-ci sont, pour cette raison, transmises à l'ordinateur par l'intermédiaire du câble 36 avec les données de mesures gyroscopiques. La position de l'appareil de mesurage 32 peut aussi être déterminée par l'intermédiaire d'un mètre à ruban ou analogue, qui, par exemple, est déroulé ou enroulé à partir de la tour de forage 40 édiflée en surface et de laquelle alors la grandeur respective de référence est transmise à l'ordinateur.

Dans l'exemple de réalisation représenté dans la figure 3, l'appareil de mesurage 42 est relié fixement à un appareil de mesurage angulaire optique 46, tel qu'un autocollimateur ou une caméra de mesurage, la position de l'appareil de mesurage est mesurée dans l'espace relativement à un point 45 de coordonnées spatiales x_b , y_b , et z_b . Pour cela, la position de l'appareil de mesurage de coordonnées x_b , y_b et z_b est déterminée dans l'espace au moyen du paquet de mesurage gyroscopique de l'appareil de mesurage 42. Afin d'établir la position, des points d'appui 44, déterminés par l'appareil de mesurage optique, sont prévus dans le secteur du point 45. Par l'intermédiaire de la détermination optique des points d'appui, la situation angulaire de l'appareil de mesurage par rapport au point 45 est ensuite calculée selon les lois optiques par l'ordinateur, vers lequel l'image recueillie est acheminée pour traitement. La caractéristique de chaque emplacement de mesurage est en outre fournie à l'ordinateur 43.

La figure 4 représente un support 48, qui est encastré à l'une de ses extrémités 50 et qui est représenté à son autre extrémité avec un bras recourbé 52, sur lequel, à distance de l'axe du support, une force provoquée par un moteur 56 agit par l'intermédiaire d'un câble 54 par exemple. Dans le câble est placée une boîte dynamométrique 58. La force respective est ici la grandeur de référence, qui est fournie à l'ordinateur 60. Sur le bras recourbé 52 du support 48 est placé un appareil de mesure 59 comportant trois gyroscopes et au moyen duquel sa position dans l'espace est fixée par les coordonnées spatiales x_b , y_b et z_b . Les signaux gyroscopiques sont fournis ici aussi à l'ordinateur.

Forme de réalisation N° 2

En ce qui concerne le mesurage de trajectoire et de contours dans l'espace, il faut un paquet de mesurage gyroscopique triaxial comportant un guidage angulaire et un dispositif pour le mesurage des distances. Celui-ci peut consister en un dispositif pour la mise en mémoire automatique de la distance lors du processus de mesurage, comme cela est représenté dans les figures 5 et 6.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 5, sur un contour à mesurer 62 est mis en place un marquage numérique codé de trajet 64, au-dessus duquel passe l'appareil de mesurage comportant les trois gyroscopes par l'intermédiaire d'un support mobile 66 représenté ici comme un véhicule de mesure. Le support mobile 66 est équipé d'un appareil capteur de déplacement 68. Les données de trajet recueillies ici sont fournies à l'ordinateur 70 comme grandeurs de référence.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 6, un contour 62 est là encore à mesurer. L'appareil de mesurage 65 est là aussi placé sur un support mobile 66 dans la direction longitudinale du contour 62. Ici, comme appareil capteur de déplacement, il est prévu une roue mesureuse 69, équipée d'une exploration optique (non représentée) roulant le long du contour à mesurer. Elle est représentée ici avec un codage numérique. Ici aussi, le chemin parcouru est fourni à l'ordinateur comme grandeur de référence.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 7, l'appareil

de mesure 72, qui, comme dans la réalisation de la figure 3 par exemple, est muni d'un appareil de mesurage de position angulaire 74, se déplace sans contact au-dessus du contour à mesurer 62. Ici, la position angulaire des coordonnées spatiales de l'appareil de mesurage 72 est, par l'intermédiaire de points d'appui 76, déterminée par rapport aux coordonnées x_b , y_b , et z_b de chacun des points d'appui. En outre, la position respective de l'appareil de mesurage dans la direction longitudinale du contour au-dessus du marquage digital de trajet 64 est établie par la caméra de mesurage.

Forme de réalisation N° 3

A la place d'un capteur de déplacement à prélèvement direct, le trajet peut également être calculé au moyen d'un paquet de mesurage triaxial d'accélération à partir de l'accélération du mécanisme dynamique de mesurage. Le système de mesurage est alors un système inertiel intégral (INS) comportant des surfaces de butée, c'est-à-dire qu'il se compose de trois gyroscopes, de trois accéléromètres et de l'ordinateur associé. Pour utiliser le procédé de la présente invention, il est entendu que pour le traitement des signaux de mesurage dans l'ordinateur, des grandeurs de référence, des marquages de position par exemple, telles qu'elles sont décrites en rapport avec la figure 3, sont également enregistrées. Ainsi, le capteur de déplacement 69 actionné mécaniquement de la figure 6 ou les marquages de trajet mis en place directement sur le contour de la figure 7 peuvent disparaître. Avec l'abandon de la base fixe, indispensable autrement, l'on obtient une très grande souplesse de mesurage.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 8, il est prévu un système inertiel intégral 80, qui peut être placé à bord d'un avion 82. Les grandeurs de référence sont ici des points de mire terrestres 84 sur le tracé du contour à mesurer, ici c'est le centre d'un carrefour, qui est représenté.

Forme de réalisation N° 4

S'agissant du mesurage d'anomalies de gravité, le système de mesurage se compose d'un INS intégral comportant des surfaces d'arrêt, d'un ordinateur pour la mise en mémoire de grandeurs de référence et en outre, comme on le voit dans la figu-

re 9, d'un dispositif 86 fixe, en au moins un emplacement sur le terrain, servant à mettre en place l'appareil de mesurage 88. Ce dispositif de mise en place est muni de surfaces de butée 90, grâce auxquelles l'appareil de mesurage peut, lors des mesures d'angles et de positions, être replacé de manière reproductible à l'emplacement sur le terrain. L'appareil de mesurage 88, dans ce cas, demeure constamment relié par l'intermédiaire d'un câble de liaison 92 au bord d'un moyen de transport, à savoir ici un hélicoptère 94.

10 Le procédé de mesurage, ainsi que le traitement ultérieur des données, est commun, en ce qui concerne l'idée de base, à toutes les formes de réalisation signifiant qu'avec des conditions extérieures de mesurage inchangées, les mesurages par différence répétés à intervalles dans le temps, par rapport à des états de mesure inconnus certes mais identiques, pour les angles et/ou la vitesse et/ou les positions sont exploités dans l'ordinateur pour le calibrage de la dérive du système et sa correction ultérieure.

L'identité de l'état de mesurage des angles à des intervalles de temps est à réaliser par des mesures constructives simples - à titre d'exemple, comme cela a déjà été indiqué, par des surfaces d'arrêt (figure 1) ou un guidage angulaire approprié du paquet de mesurage (figure 2). Comme cela sera décrit encore ci-dessous, des mesures angulaires vidéo- optiques par exemple du paquet de mesurage gyroscopique non guidé peuvent aussi être insérées en ce qui concerne les surfaces ou les trajectoires à mesurer (figure 3).

Lors de l'enregistrement des caractéristiques d'angles ou de positions, comme cela est traité en détail dans le document EU-91107567.9, les forces ou les moments introduits ou résultants sont traités dans l'ordinateur comme grandeurs de référence pour l'identité de l'état de mesurage pour les angles inconnus et/ou les positions inconnues (figure 4). Cela est recevable, puisque, pour les mesures des caractéristiques entre ces grandeurs de référence et les angles et/ou les positions, l'existence d'une relation univoque est bien admise.

L'identité de l'état de mesurage par rapport à une posi-

tion à des intervalles dans le temps est obtenue par exemple par un aller et retour sur le même parcours (figures 5 à 7), grâce à un marquage approprié d'une multiplicité théoriquement infinie de points pouvant servir pour le calibrage de la dérive du système. Mais, le retour peut aussi avoir lieu sur un parcours différent : il suffit de veiller à ce que, dans ce cas, les mesures soient entreprises par rapport aux mêmes points terrestres fixes (appelés dans ce qui suit points de croisement) qu'à l'aller (figures 8 et 9). L'identité des points de croisement peut être également communiquée alors à l'ordinateur sous forme de nombres comme grandeurs de référence.

- Intégration des trois mesurages gyroscopiques pour la détermination spatiale de la direction ;
- Compensation de la vitesse de la terre ;
- Traitement adapté des données pour le calibrage des 3 gyroscopes et correction du système.

Les deux premiers points sont, quant à leur principe, transférables à partir de tout système inertiel moderne "strapdown" et sont décrits par exemple dans Gyroscopic Instruments and their Application to Flight Testing, AGARDograph N° 160, Vol. 15, Septembre 1982, Chapitre 7.4.4. Les mesures gyroscopiques sont soumises à l'intégration dans une matrice de transformation \underline{C}_{nb} pour la transformation vectorielle d'un système de coordonnées lié au corps (x_b, y_b, z_b) en un système de coordonnées géographiques ou de navigation ($x_n = N = \text{nord}, y_n = E = \text{est}, z_n = D = \text{bas}$). Il convient de considérer ici en premier lieu, que, eu égard à leur physique, les gyroscopes mesurent la rotation $\underline{\omega}^{ib}$ par rapport à l'espace inertiel (index i) et qu'une matrice de transformation correspondante \underline{C}_{ib}^* réalise l'intégration de leurs signaux de mesure en fonction de l'égalité différentielle

$$(4.1) \underline{C}_{ib}^* = \underline{C}_{ib}^* \int \underline{\omega}^{ib*}$$

avec

$$(4.2) \underline{\Omega}^{ib*} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ \omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix}^{ib*}$$

Dans ce cas, le signe * signifie que, eu égard à l'incertitude de mesurage des capteurs, l'intégration est entachée d'erreur. Séparer cette incertitude de mesurage du procédé de mesurage proprement dit, tel est l'objet de la présente invention et il en sera traité plus loin.

L'on obtient la matrice de transformation recherchée \underline{C}_{nb} d'après la relation suivante :

$$(4.3) \quad \underline{C}_{nb}^* = \underline{C}_{ni}^* \underline{C}_{ib}^* = \underline{C}_{in}^{T*} \underline{C}_{ib}^*,$$

\underline{C}_{in}^{T*} étant déterminé à partir de l'intégration de

$$10 \quad (4.4) \quad \dot{\underline{C}}_{in}^* = \underline{C}_{in}^* \underline{\Omega}^{in*}$$

Puisque la plupart des mesures d'angles sont étroitement limitées localement et que, de ce fait, les influences de la rotondité de la terre sont négligeables, l'intégration de \underline{C}_{ni}^* ne se fonde que sur la vitesse de la terre en fonction de la latitude ϕ

$$(4.5) \quad \underline{\omega}^{ie} = \omega^{ie} (\cos\phi \quad 0 \quad -\sin\phi)^T,$$

dont les composants déterminent les éléments de la matrice antisymétrique

$$(4.6) \quad \underline{\Omega}^{in*} = \underline{\Omega}^{ie*} = \omega_{ie} \begin{pmatrix} 0 & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & 0 & -\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & 0 \end{pmatrix}$$

20 Dans ce cas, il est entendu que la vitesse de la terre est connue avec une précision suffisante et que son intégration s'effectue sans erreur et que, par conséquent, dans les égalités (4.4) à (4.6), le signe * peut également être abandonné.

25 L'intégration des égalités (4.1) et (4.4) nécessite une pose des conditions initiales. Cela est très simple dans l'égalité (4.1), puisque l'on peut, au début, mettre à zéro la longitude et qu'ici seule intervient la latitude ϕ de la position de mesure

$$30 \quad (4.7) \quad \underline{C}_{in,0} = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix}$$

Dans l'égalité (4.1), cela se traduit par la relation

$$(4.8) \quad \underline{C}_{in,o} = \underline{C}_{in,o} \underline{C}_{n,bo}$$

Dans $\underline{C}_{nb,o}$ s'intègre la direction initiale du paquet de mesurage gyroscopique en fonction des directions du nord et de la verticale mesurées par rapport au système géographique de référence. De manière appropriée et selon un procédé connu, elle est, au moyen de capteurs externes (compas magnétique, gyroscope dirigé vers le nord et nivellement) déterminée sous la forme par exemple des 3 angles eulériens - angles de roulis, d'inclinaison longitudinale et de lacet - pour asseoir les 9 éléments de la matrice $\underline{C}_{nb,o}$ recherchée, d'après des relations mathématiques connues (Luftfahrt Norm LN 9300, Beuth Vertrieb GmbH Köln, 1970). Les mesures gyroscopiques menées ultérieurement se rapportent naturellement à la direction fixée avec $\underline{C}_{nb,o}$. Grâce au procédé de mesurage décrit ici, l'on n'enregistre pas d'erreur dans la direction de référence par rapport au système de coordonnées géographiques.

Pour l'exploitation des données, le modèle de transmission d'erreur doit être connu dans le système de mesurage. A cette fin, la matrice de transformation \underline{C}_{ib}^* et la matrice $\underline{\Omega}^{lb^*}$ (voir égalités (4.1) et (4.2) intégrées par l'intégration des mesures gyroscopiques sont dissociées en :

$$(4.9) \quad \underline{C}_{ib}^* = \underline{C}_{i^*i} \underline{C}_{ib}$$

et

$$(4.10) \quad \underline{\Omega}^{ib^*} = \underline{\Omega}^{ib} + \underline{D}$$

\underline{C}_{i^*i} englobe l'erreur d'alignement modifiée dans le temps entre le système de référence réel et le système de référence stabilisé, que l'on peut encore écrire

$$(4.11) \quad \underline{C}_{i^*i} = \underline{I} + \underline{\varepsilon}^{i^*i} = \underline{I} - \underline{\varepsilon}^{ii^*}$$

avec \underline{I} = matrice unité et $\underline{\varepsilon}^{ii^*}$ une matrice antisymétrique, dont les éléments sont les angles d'erreur d'alignement, très petits en règle générale, ε_x , ε_y et ε_z entre deux systèmes de coordonnées :

$$(4.12) \quad \underline{\underline{\varepsilon}}_{ii^*} = -\underline{\underline{\varepsilon}}_{i^*i} = - \begin{pmatrix} 0 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 0 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 0 \end{pmatrix}$$

\underline{D} est une matrice antisymétrique, qui renferme les dérivées gyroscopiques dans la direction des trois axes de mesure D_x , D_y et D_z :

$$5 \quad (4.13) \quad \underline{D} = \begin{pmatrix} 0 & -D_z & D_y \\ D_z & 0 & -D_x \\ -D_y & D_x & 0 \end{pmatrix}.$$

Les autres déductions ont comme but de montrer, de manière exemplaire, pour ces formes de réalisation et les autres, comment les dérivées de capteurs - ici D et sa modification dans le temps R - sont, en fonction des mesurages de différence de dérivées (ici mesurage $\Delta \mathcal{E}$) à évaluer le plus favorablement.

Pour la matrice, transformée dans le système de coordonnées lié au corps, des angles d'erreur d'alignement entre le système réel de coordonnées et le système de coordonnées calculé lié à l'espace

$$(4.14) \quad \underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{C}_{bi} \varepsilon_j \underline{C}_{ib}$$

l'on peut déduire, à partir de (4.1) et de (4.9) jusqu'à (4.11), l'équation différentielle vectorielle suivante, qui est élargie par une mise en équation du temps pour la modification de dérive

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_b = -\underline{Q}^{ib} \varepsilon_b + \underline{D} + \underline{wD}$$

$$\underline{D} = \underline{R} + \underline{wD}$$

$$(4.15) \quad \underline{R} = \underline{0} + \underline{wR},$$

avec $\underline{0}$ = vecteur nul

25 L'égalité (4.15) est de la forme

$$(4.16) \quad \underline{\dot{x}} = \underline{F} \underline{x} + \underline{w}$$

avec

$$(4.17) \quad \underline{x} = (\underline{\varepsilon}^T \quad \underline{D}^T \quad \underline{R}^T)^T$$

et

$$(4.18) \quad \begin{aligned} \underline{\varepsilon} &= (\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z)^T \\ \underline{D} &= (D_x \quad D_y \quad D_z)^T \\ \underline{R} &= (R_x \quad R_y \quad R_z)^T \end{aligned}$$

$$(4.19) \quad \underline{F} = \begin{pmatrix} -\underline{Q}^{ib} & \underline{I} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{I} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix}$$

$$(4.20) \quad \begin{aligned} \underline{w} &= (\underline{w}_D^T \quad \underline{w}_D^T \quad \underline{w}_R^T)^T \\ \underline{w}_D &= (w_{Dx} \quad w_{Dy} \quad w_{Dz})^T \\ \underline{\dot{w}}_D &= (\dot{w}_{Dx} \quad \dot{w}_{Dy} \quad \dot{w}_{Dz})^T \\ \underline{\dot{w}}_R &= (\dot{w}_{Rx} \quad \dot{w}_{Ry} \quad \dot{w}_{Rz})^T \end{aligned}$$

Dans l'égalité (4.9), \underline{Q} est une matrice nulle 3x3 et \underline{I} la matrice unité 3x3. Le vecteur \underline{w} englobe une composante stochastique imprévisible. Ainsi, par exemple, l'intégration de \underline{w}_D amène à une erreur de système connue sous le vocable erreur angulaire "random walk".

Avec l'aide de la matrice de transition $\underline{\Phi}(t_j, 0)$ calculable dans l'ordinateur pour tout instant t_j à partir de (4.16) [Gyroscopic Instruments and their Application to Flight Testing, AGARDograph n° 160, Vol. 15, Septembre 1982, Chapitre 7.3], la relation entre l'erreur de système modifiée dans le temps $\underline{x}(t_j)_v = \underline{x}_{j,v}$ et l'erreur initiale de système \underline{x}_0 peut être mise en modèle, l'index v exprimant que le calcul réussit en avançant dans le temps :

$$(4.21a) \quad \underline{x}_{j,v} = \underline{\Phi}(t_j, 0) \underline{x}_0$$

En outre, différemment, l'on peut aussi calculer $\underline{x}_{j,r}$ en sens inverse dans le temps à partir du point d'arrivée T :

$$(4.21b) \quad \underline{x}_{j,r} = \underline{\Phi}(t_j, T) \underline{x}_T$$

Puisque les dérives \underline{D} de gyroscope et leurs modifications dans le temps R ne peuvent pas, en règle générale, être déterminées directement mais seulement par l'intermédiaire de la dérive angulaire intégrée $\underline{\xi}$, le modèle pour la dérive de système à mesurer est :

$$(4.22a) \quad \underline{\varepsilon}_{j,v}^* = \underline{H} \underline{x}_{j,v} + \underline{v}_j = \underline{H} \underline{\Phi}(t_j, 0) \underline{x}_0 + \underline{v}_j,$$

ou

$$(4.22b) \quad \underline{\varepsilon}_{j,r}^* = \underline{H} \underline{x}_{j,r} + \underline{v}_j = \underline{H} \underline{\Phi}(t_j, T) \underline{x}_T + \underline{v}_j.$$

avec

$$(4.23) \quad \underline{H} = \begin{pmatrix} \underline{I} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix}.$$

et \underline{v}_j l'incertitude dans le mesurage angulaire. Selon l'état de la technique, pour estimer les erreurs des capteurs \underline{D} et \underline{R} , il faut une pluralité de mesures angulaires $\underline{\xi}$ en rapport avec des références angulaires rigoureuses. Dans le procédé de calibrage évoqué au début, avant ou après le mesurage proprement dit et dans le procédé support évoqué, c'est une condition impérative. Le procédé de mesurage à la base de la présente invention ne suppose pas, pour le calibrage des capteurs, le mesurage de l'angle par rapport à une référence connue, mais le mesurage de la différence angulaire par rapport à des états de mesurage inconnus certes, mais identiques et débutant à des instants t_{j1} et t_{j2} différents. Les modèles pour les erreurs de système à mesurer sont alors :

$$(4.24a) \quad \underline{y}_{j,v} = \underline{H}(\underline{\Phi}(t_{j2}, 0) - \underline{\Phi}(t_{j1}, 0)) \underline{x}_0 + \underline{v}_j$$

ou

$$(4.24b) \quad \underline{y}_{j,r} = \underline{H} (\underline{\Phi}(t_{j2}, T) - \underline{\Phi}(t_{j1}, T)) \underline{x}_T + \underline{v}_j.$$

A la base de ces deux relations, l'on trouve le même mesurage de différence des erreurs de système, qui s'énonce dans la forme de réalisation N° 1 :

$$(4.25) \quad \underline{y}_{j,v} = \underline{y}_{j,r} = \underline{y}_j = \Delta \underline{\varepsilon}_{j,1}^* = \underline{\varepsilon}_{j2}^* - \underline{\varepsilon}_{j1}^*.$$

Les égalités (4.24a,b) sont décrites dans ce qui suit comme le "Modèle pour la différence d'erreur de système à

mesurer". Pour un mesurage angulaire en continu au cours d'un aller et retour du paquet de mesurage gyroscopique sur le même parcours avec un guidage angulaire du paquet de mesurage, l'on dispose en conséquence, avec les mesurages de différences angulaires entre deux états de mesurage identiques à l'aller et au retour, de nombreuses possibilités d'évaluation, infinies théoriquement, pour ce procédé d'évaluation.

Les modèles pour le mesurage de la différence d'erreurs de système sont des fondements pour algorithmes - régression ou filtration de Kalman - en vue de l'estimation des erreurs de capteurs sous forme de paramètres d'état :

$$(4.26a) \quad \hat{x}_0 = (\hat{\varepsilon}_0 \quad \hat{D}_v \quad \hat{R}_v) .$$

ou

$$15 \quad (4.26b) \quad \hat{x}_T = (\hat{\varepsilon}_T \quad \hat{D}_r \quad \hat{R}_r) .$$

Les erreurs de capteurs sont désignées ici par les indices v et r , puisqu'en règle générale, l'évaluation des données à l'aller et au retour donne des résultats différents. Pour tout instant de mesure, l'erreur de système peut, dans le cours du temps, être déterminée selon deux estimations :

$$(4.27a) \quad x'_v(t) = \underline{H} \underline{\Phi}(t,0) \hat{x}_v$$

ou

$$(4.27b) \quad x'_r(t) = \underline{H} \underline{\Phi}(t,T) \hat{x}_r .$$

25 La variation optimale d'erreurs de système résulte d'une moyenne pondérée des deux variations. Elle sert de base pour la correction ultérieure des mesures.

Si les mesures stochastiques des erreurs des capteurs \underline{w}_D , \underline{w}'_D et \underline{w}'_R sont infiniment petites, expérimentalement, les erreurs réelles et estimées des capteurs concordent avec une précision élevée :

$$(4.28) \quad \hat{D} = \underline{D} \quad \text{et} \quad \hat{R} = \underline{R}$$

Sinon, \hat{D} et \hat{R} sont une approximation des variations effectives des erreurs des capteurs.

Comme le document EU-91107567.9 les décrit, certaines conditions sont à maintenir pour la séquence temps des mesurages. Par exemple, si l'incertitude de mesurage \mathcal{E} du mesurage angulaire ne se produisant que dans un plan de référence est donnée par

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= D \\ (4.29) \quad D &= R \\ R &= 0, \end{aligned}$$

alors la matrice de transition unidimensionnelle correspondant à l'égalité est :

$$(4.30) \quad \underline{\Phi}(t,0) = \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1/2 t^2 \end{pmatrix}$$

et le modèle pour la mesure des erreurs de système correspondant aux égalités (4.24a) et (4.25) est

$$(4.31) \quad \Delta \varepsilon_{j,1} = \begin{pmatrix} 0 & (t_{j2} - t_{j1}) & 1/2(t_{j2}^2 - t_{j1}^2) \end{pmatrix} (\varepsilon_0 \quad D \quad R)^T + v_j.$$

Afin de pouvoir continuer à observer les coefficients D et R recherchés à partir des mesures de différences, l'instant entre la 1ère et la 2ème mesure doit être commandé à des emplacements respectifs $j(t_{j1}, t_{j2})$ de manière que le rapport

$$(4.32) \quad (t_{j2}^2 - t_{j1}^2) / (t_{j2} - t_{j1}) = t_{j2} + t_{j1},$$

qui est identique à la moyenne arithmétique entre les instants de mesurage aux mêmes emplacements de mesurage, ne demeure pas constant, mais varie.

Ce procédé d'estimation de l'incertitude du mesurage de système de mesures par gyroscopes comportant une correction subséquente des mesures est esquissé dans la figure 10 sous forme d'un schéma fonctionnel pour un programme d'ordinateur.

S'agissant des réalisations connues jusqu'à ce jour, l'on était tout d'abord parti de ce que le paquet de mesurage gyroscopique était en contact physique avec les surfaces faisant l'objet des mesures. Dans de nombreux cas d'utilisation, le mesurage sans contact d'angles spatiaux est particulièrement intéressant, des procédés optiques de mesurage étant d'une utilisation appropriée pour le mesurage indispensable

de l'angle entre la surface de mesure et le paquet de mesurage gyroscopique, comme cela est esquissé dans la figure 3. Au lieu du mesurage direct de l'angle inconnu, le mesurage a lieu ici entre les directions de référence b et n ainsi que b' et b , avec b' = direction de référence à mesurer et b = direction de référence du paquet de mesurage gyroscopique. La matrice de transformation recherchée est alors :

$$(4.33) \quad \underline{C}_{nb'}^* = \underline{C}_{nb}^* \underline{C}_{bb'}^*$$

avec $\underline{C}_{b'b}^*$ = matrice de transformation à calculer à partir du système optique de mesurage. Le signe * indique dans ce cas, qu'en règle générale la mesure optique est elle aussi entachée d'erreur. Dans cette forme de réalisation, l'appareil de mesurage est comparable à un autocollimateur usuel, mais sans la base fixe indispensable selon l'état de la technique.

Le procédé de mesurage et d'évaluation décrit présuppose que les facteurs d'intégration des gyroscopes sont connus avec une précision suffisante. Des valeurs relatives de stabilité sont garanties aujourd'hui avec un ordre de grandeur de 10^{-3} par les fabricants de gyroscopes. Si cette valeur n'est pas suffisante, le paquet de mesurage gyroscopique doit être calibré avant son utilisation. Cela ne présente aucune difficulté, dans la mesure où le facteur d'intégration est tout simplement à déterminer par le mesurage d'un angle connu. Ainsi, en pratique, l'angle 360° peut être réalisé à l'aide d'une surface plane avec butée.

Le procédé de calibrage avec facteur d'intégration utilise le procédé par mesurage d'angles décrit plus haut. Un indicatif est fourni à l'ordinateur pour ce type d'exploitation. Le gyroscope à calibrer est placé avec son axe sensible perpendiculaire à la surface et amené contre la butée. Le nombre 0 est introduit dans l'ordinateur comme grandeur de référence. L'on tourne de 360° le gyroscope sur la surface et on le ramène contre la butée, après quoi, le nombre 1 est introduit. Après d'autres mouvements dans un sens variable de rotation, des mesures sont caractérisées par des nombres successifs. L'ordinateur détermine ensuite la dérive de mesurage variable dans le temps en utilisant le fait que

dans le mesurage du gyroscope, après une rotation positive et une rotation négative de 360° , la composante d'une erreur constante du facteur d'intégration est ramenée à zéro. La dérive dite ($\dot{\epsilon}$) du mesurage du gyroscope est alors purement et simplement contenue dans les différences de mesurages exprimées par des nombres en degrés ou non. Après évaluation de sa variation $\hat{\epsilon}(t)$ et sa correction, les mesurages d'angles gyroscopiques corrigés, qui doivent se chiffrer après une rotation respective de $\pm 360^\circ$, sont en place dans l'ordinateur. L'erreur du facteur d'intégration du gyroscope est à déterminer à partir de la différence et à éliminer par correction.

Mesurage de contours polygonaux et de contours dans l'espace.

Un système de navigation à l'estime pour la détermination en continu de la position d'un véhicule se compose d'un capteur de déplacement ou d'un tachymètre, d'une référence de direction et d'un ordinateur pour déterminer la position du véhicule dans un système de coordonnées géographiques (index n) à partir de signaux de mesures. Pour la détermination spatiale de contours polygonaux et de contours, la vitesse \underline{V}_b déterminée liée au solide (index b) doit, selon le même principe, être à l'aide de la matrice de transformation \underline{C}_{nb} transformée dans le système de coordonnées géographiques et intégrée conformément à

$$(5.1) \quad \underline{S}_n = \int_0^t \underline{V}_n dt = \int_0^t \underline{C}_{nb} \underline{V}_b dt$$

et avec l'emploi de capteurs de déplacements, il en résulte une sommation du mesurage incrémentiel et transformé du mesurage de déplacement correspondant à

$$(5.2) \quad \underline{S}_n = \sum \underline{C}_{nb} \Delta \underline{S}_b .$$

Par rapport à la forme de réalisation N° 1, en vue du mesurage de contours polygonaux, le paquet gyroscopique triaxial comportant un guidage angulaire est purement et simplement à compléter par un capteur servant à déterminer la vitesse ou le déplacement incrémentiel, pour cela l'on dispose de 3 alternatives :

a) mise en mémoire de la distance prémarquée pendant le pro-

- cessus de mesurage (figure 5) ;
- b) mesurage de la distance par un traceur de route pendant le processus de mesurage (figure 6) ;
- c) mesurage de l'accélération linéaire du processus de mesurage et détermination de la distance de la même manière que dans un système de navigation inertielle selon la technique "strapdown".

Dans la forme de réalisation N°2a, la distance prémarquée est caractérisée de manière adéquate par le collage d'une bande divisée numériquement et de résolution aussi élevée que possible (figure 5). La détermination de la position de mesure, c'est-à-dire du contour polygonal ou du contour résultant de l'utilisation sur l'aller et le retour de l'égalité (5.2) par l'ordinateur. Comme cela a été évoqué au début, les mêmes distances sont parcourues à cet effet dans le sens positif et dans le sens négatif ou, pour des contours fermés, deux fois dans la même direction. Mais le retour peut aussi avoir lieu sur un trajet différent avec croisement de l'itinéraire aller. Pour l'évaluation des données, l'on ne dispose bien sûr alors que des points de croisement ainsi que du point initial et du point d'arrivée. La figure 11 montre le schéma fonctionnel du processus de saisie et d'exploitation des données pour cette forme de réalisation.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 6, le paquet de mesurage-gyroscopique est pourvu d'un capteur de déplacement semblable au compteur de distance d'un véhicule automobile (figure 6) et le tronçon de trajet mesuré incrémentiellement ΔS_b est traité comme dans le cas précédent.

La forme de réalisation comportant un système inertiel intégral de navigation, réalise sans doute le mesurage le plus souple des contours polygonaux, des contours et des trajectoires dans l'espace.

Avec l'incorporation de trois capteurs inertiels supplémentaires, le comportement des erreurs de système se trouve influencé par des paramètres d'erreur supplémentaires - dans chaque accéléromètre par une erreur de facteur d'intégration et par une erreur quasi constante (Bias). Des modifications dans le temps du Bias ne sont pas à différencier des influen-

ces d'une dérive de gyroscope et sont par conséquent déterminées également par l'estimation de celle-ci. L'erreur de facteur d'échelle concernant l'accéléromètre entraîne au niveau du système une erreur de position dépendant du trajet
 5 et ne peut être déterminée par le procédé de la présente invention, contrairement au Bias. Soit au début, soit à la fin de la campagne de mesure, il faut tenir compte de l'influence d'une possible erreur de facteur d'intégration par calibrage selon le procédé connu, ou bien il faut faire inter-
 10 venir à cette fin des points de référence de position connus, lesquels soient aussi éloignés que possible du point initial.

Selon la théorie, l'incertitude de mesure d'un tel système, aussi bien au plan de l'angle (cap, position), de la vitesse qu'au plan de la position, est, en première approximation, s'exprime au moyen d'un système d'équations différentielles du premier ordre correspondant à l'égalité
 15 (4.15) avec le vecteur d'état [Cyroscopic Instruments and their Application to Flight Testing]:

$$(5.3) \quad \underline{x} = (\underline{e}^T \quad \delta \underline{V}_n^T \quad \delta \underline{S}_n^T \quad \underline{D}^T \quad \underline{R}^T \quad \underline{B}^T)^T,$$

20 où $\delta \underline{V}_n$ = vecteur de l'erreur de vitesse, $\delta \underline{S}_n$ = vecteur de l'erreur de position, \underline{B} = vecteur de l'erreur de mesure de l'accélération. La matrice de transition $\underline{\Phi}(t_j, 0)$ ou $\underline{\Phi}(t_j, T)$ est, en tant que modèle pour la différence à mesurer de l'erreur de système (voir égalité (4.24), calculable de la
 25 même manière pour chaque instant t_{j1} ou t_{j2} .

La présente invention permet en utilisant un système inertiel intégral pour le mesure de tracés linéaires, contours et trajectoires spatiaux les procédés suivants de mesure et d'évaluation pour l'estimation des incertitudes de mesure de système sous forme de
 30

- 1) mesure de la différence de position et/ou
- 2) mesure de la différence de vitesse et/ou
- 3) mesure de la différence d'angle.

En comparaison avec l'état de la technique, au plan de
 35 la vitesse, on peut exploiter aussi le processus ZUPT décrit plus haut, c'est-à-dire le mesure de la vitesse absolue nulle dans le support de système, de même que la mesure de la différence de vitesse par rapport à n'importe quelles mesures

de vitesse nulles aux autres instants t_j et t_k .

L'on dispose théoriquement d'une infinité de mesures de différence de position, lors de l'aller et du retour du système inertiel par le même itinéraire, ainsi que lors de l'en-
5 registrement de marquages ou de la zone de terrain survolée (figure 8), ce sur quoi l'on reviendra encore plus loin.

Les mesures sont, de la même manière, concevables en fonction des points de croisement, lorsque l'itinéraire retour diffère de celui aller, mais le croise ou s'en approche, comme
10 cela a déjà été indiqué plus haut. Des mesurages combinés de différences d'angles, de vitesses, de positions sont exécutable par exemple pour le mesurage de ces 3 paramètres sur l'itinéraire retour, si, sur l'itinéraire aller, un dispositif fixe de réception pour le système inertiel est ancré à des
15 points discrets (figure 9). Pour un mesurage en continu de l'angle et de la position, un guidage mécanique du système inertiel est indispensable le long du trajet de mesurage (figure 2) ou encore un mesurage correspondant sans contact (figure 7).

20 L'exploitation des données est conduite identiquement quant au principe à celles évoquées ci-dessus, le vecteur de mesure pour $\delta \underline{S}$ et/ou $\delta \underline{V}$ et/ou $\underline{\xi}$ étant défini par \underline{H} . Le schéma fonctionnel correspondant est esquissé dans la figure 12.

Le mesurage sans contact de contours est dans la prati-
25 que d'un intérêt particulier. La photogrammétrie est ici solidement établie selon l'état de la technique. Avec une liaison fixe de la caméra de mesurage et d'un paquet de mesurage gyroscopique (figure 7) et en utilisant l'idée de la présente invention de la manière décrite plus haut, des possibilités
30 entièrement nouvelles se font jour pour cette technique de mesurage également, puisque cette combinaison est à considérer comme un théodolithe photogrammétrique, mais sans la base fixe exigée selon l'état de la technique (Document FORUM, cahier 4/1987, pages 193-213).

35 Pour un mesurage de trajectoires aussi, d'une ligne de vol par exemple, l'ensemble INS, caméra vidéo (figure 8) constitue une combinaison très favorable, puisqu'ainsi, en utilisant exclusivement des moyens autonomes de bord et l'objet

de la présente invention, un accroissement de la justesse est possible en utilisant des références externes inconnues. L'exploitation des données s'effectue dans ce cas de la manière suivante. Avec \underline{S}_j , = point du terrain remarquable, identique pour l'aller et le retour (du vol), $\Delta \underline{S}_{j1}^*$ et $\Delta \underline{S}_{j2}^*$ = les mesures de position de la caméra vidéo différentes, en règle générale, pour l'aller et le retour en fonction de ce point, \underline{S}_{j1} et \underline{S}_{j2} = la ligne de vol réelle à l'aller et au retour et $\delta \underline{S}_{j1}$ ainsi que $\delta \underline{S}_{j2}$ = les erreurs correspondantes de position INS, aux deux instants la position INS mesurée est :

$$(5.5a) \quad \underline{S}_{j1}^* = \underline{S}_j' + \Delta \underline{S}_{j1}^* + \delta \underline{S}_{j1}$$

et

$$(5.5b) \quad \underline{S}_{j2}^* = \underline{S}_j' + \Delta \underline{S}_{j2}^* + \delta \underline{S}_{j2}$$

d'où l'on conclut que, dans le mesurage de la différence de l'erreur de position, la position absolue du point du terrain s'élimine et que ses coordonnées n'ont pas besoin d'être connues. Les distances effectives $\Delta \underline{S}_{j1}^*$ et $\Delta \underline{S}_{j2}^*$ entre point du terrain et INS n'interviennent pas non plus dans ce mesurage de différence, mais seul le mesurage relatif vidéo $\Delta \underline{S}_{j2,1}^*$ entre l'aller et le retour, comme la figure 8 l'esquisse. Pour l'exploitation des données par conséquent, l'on fait intervenir peu de points marquants du terrain, qui peuvent être gardés en visée un laps de temps plus ou moins long, et le terrain enregistré vidéo optiquement en continu. Même pour un court laps de temps de mesurage vidéo d'un seul point du terrain à l'aller et au retour, une multiplicité de possibilités de combinaisons se présente pour la détermination des mesurages de différences concernant l'erreur de position. Il va de soi qu'un point externe de référence au moins (point de départ ou point du terrain par exemple), auquel la ligne de vol définitive se réfère, doit être connu pour l'exploitation des données. Pour la précision du procédé, un second point de référence est intéressant à l'arrivée du vol.

Mesurage de déroulements de mouvements.

La rotation et la translation des corps déterminent leurs mouvements. Leur mesurage se réalise de manière appropriée

avec un système inertiel intégral (INS). Dans le domaine de la haute fréquence, l'on peut en règle générale utiliser les signaux de sortie non corrigés d'un INS pour le mesurage précis des déroulements de mouvements, puisque, comme cela a été
5 évoqué plus haut, l'incertitude de mesurage INS ne se manifeste qu'avec le temps croissant. Il n'est donc pas nécessaire de rechercher à améliorer les mesurages en utilisant l'enseignement de la présente invention.

En revanche, ce dernier offre de l'intérêt dès lors que
10 le déroulement de mouvement d'un corps doit être suivi avec une grande précision durant un long intervalle de temps sous forme d'un mesurage synchrone de sa position relative et/ou de son trajet.

Selon l'état de la technique, l'INS s'appuie à cet effet
15 sur les mesurages externes de positions et de vitesses, lors d'essais en vol par des mesurages radar par exemple.

S'agissant du mesurage des déroulements de mouvements, la présente invention offre un intérêt dans la mesure où elle autorise un calibrage INS autonome de bord par des mesurages
20 séquentiels répétés d'angles, de vitesses et de positions par rapport à des repères inconnus, mais identiquement stationnaires et terrestres.

Dans ce cas, le calibrage n'est réalisé que par le mesurage de positions. Lors d'essais d'avions ou de véhicules,
25 un ou plusieurs repères de trajectoires ou caractéristiques de terrains sont par exemple survolés ou passés à plusieurs reprises séquentiellement et enregistrés vidéo-optiquement en vue d'une exploitation photogrammétrique. Mais, comme cela a déjà été décrit ci-dessus, cela peut aussi s'effectuer
30 en quasi continu. L'exploitation des données est par conséquent identique au procédé de mesurage de trajectoires et de contours décrit (figure 12).

Mesurage d'anomalies de gravité.

Le mesurage d'anomalies de gravité en importance et en
35 position par rapport à une direction de référence liée à la terre est une combinaison d'un mesurage très précis de position et d'accélération. Elles sont mesurées selon l'état de la technique au moyen

- de gravimètres spéciaux en exploitation fixe ou
- de systèmes inertiels en exploitation dynamique.

Dans ce dernier cas, eu égard à l'erreur INS mesurée au plan de la vitesse et de la position, l'on conclut à l'
5 anomalie de gravité effective pendant un passage.

La présente invention, avec utilisation d'un INS, ouvre un chemin direct pour le mesurage de modifications d'anomalies de gravité par rapport à la valeur au point de départ. Cela est compréhensible avec les formes d'utilisation N° 2
10 et 3. En utilisant des dispositifs de recueil à des positions de mesurage (figure 9), les mesurages de différences sont possibles tant au plan de la position et de la vitesse qu'à celui des angles pour le calibrage précis INS et la détermination de l'influence de la gravité.

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour le mesurage d'angles au moyen de gyroscopes, deux mesures au moins étant effectuées à intervalle dans le temps avec les mêmes directions de référence et introduites dans un ordinateur (26,38,43,60,70) sur la base de modèles pour le rapport entre les mesures et les erreurs de système, en vue de l'estimation optimale de l'erreur de système et, reposant sur cela, une correction des mesures étant effectuée, caractérisé en ce que
- 10 - avec les gyroscopes, sont, par rapport à des directions inconnues et modifiées dans le temps, effectuées des mesures angulaires spatiales, qui sont répétées à intervalle dans le temps t_{j1} et t_{j2} pour des références identiques de direction (j = direction de la mesure répétée, 1,2 = instants),
- 15 - pour les mesures répétées vis-à-vis des directions identiques de référence j , les différences \underline{y}_j des mesures de gyroscope sont établies dans l'ordinateur par traitement ultérieur des données,
- 20 - les modèles pour l'élaboration dans le temps des différences d'erreurs de système, incluant les erreurs de capteurs, sont calculés dans l'ordinateur pour l'instant 0 de début du mesurage en avançant dans le temps et selon des égalités comportant les différences de mesurage \underline{y}_j , telles que des égalités conformes à (cf. figures 10,11,12)

$$\underline{y}_{j,v} = \underline{H} (\underline{\Phi}(t_{j2},0) - \underline{\Phi}(t_{j1},0)) \underline{x} + \underline{v}$$

$$\underline{y}_{j,r} = \underline{H} (\underline{\Phi}(t_{j2},T) - \underline{\Phi}(t_{j1},T)) \underline{x} + \underline{v}$$

avec les index v et r pour "en avant" et "en arrière" dans le temps et

30 $\underline{H} = (\underline{I} \quad \underline{0} \quad \underline{0})$ = matrice de mesure

$\underline{\Phi}(t, 0)$ = matrice de transition du point 0 vers t

$$\underline{x} = (\underline{\varepsilon}^T \quad \underline{D}^T \quad \underline{R}^T)^T = \text{vecteur d'erreur de système,}$$

avec $\underline{\varepsilon}$ = vecteur de dérive angulaire, \underline{D} = vecteur de dérive du gyroscope et \underline{R} = vecteur de modification dans le temps de

35 dérive de gyroscope et

\underline{v} = souffle de mesurage,

et servent à l'estimation optimale des erreurs de système,

- de là, deux fonctions de temps des erreurs de système estimées de manière optimale $\hat{\underline{x}}_v$ et $\hat{\underline{x}}_r$ sont, en partant du début et de la fin du mesurage, calculées comme bases pour une fonction de temps $\hat{\underline{x}}$ commune obtenue par moyenne pondérée,
- une correction des mesures est effectuée à l'aide de cette fonction de temps de l'erreur de système.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on choisit pour caractériser des directions identiques de référence des grandeurs de référence, qui sont avec les directions de référence dans un rapport physique indiscutable.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'en vue de l'observation de la modification dans le temps des erreurs de capteurs, les temps, déterminés arithmétiquement, auxquels l'on présuppose l'existence d'états identiques de mesurage, varient de manière significative.

4. Procédé selon les revendications 1 à 3, caractérisé en ce que pour le mesurage des trajectoires, les gyroscopes sont déplacés au moins deux fois à des points fixes de la trajectoire et en ce que les mesures angulaires par rapport aux directions de référence de la trajectoire sont répétées aux points fixes.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que des capteurs de mesurage de distance sont utilisés pour déterminer les points fixes.

6. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que - en vue du mesurage de trajectoires, l'on utilise un système inertiel (INS) comportant trois gyroscopes, trois accéléromètres et un ordinateur, avec un vecteur d'erreur de système ;

$$\underline{x} = (\underline{\varepsilon}^T \quad \delta \underline{V}_n^T \quad \delta \underline{S}_n^T \quad \underline{D}^T \quad \underline{R}^T \quad \underline{B}^T)^T$$

avec $\delta \underline{V}_n$ = vecteur d'erreur de vitesse,

$\delta \underline{S}_n$ = vecteur d'erreur de position et

\underline{B} = vecteur d'erreur de mesure d'accélération ;

- par rapport aux points fixes de la trajectoire, à deux reprises au moins, est effectuée, à intervalle dans le temps, une mesure de position ;

5 - pour les mesures répétées vis-à-vis des points fixes identiques j , les différences \underline{y}_j des mesures de position INS sont établies par l'ordinateur dans le traitement ultérieur des données ;

10 - dans l'ordinateur, les modèles pour l'élaboration dans le temps des différences d'erreurs de système, incluant les erreurs de capteurs, sont calculés pour l'instant 0 du début du mesurage en avançant dans le temps et selon des égalités comportant les différences de mesurage \underline{y}_j , telles que des égalités conformes à (cf. figures 10,11,12) :

$$\underline{y}_{j,v} = \underline{H} (\underline{\Phi}(t_{j2},0) - \underline{\Phi}(t_{j1},0)) \underline{x} + \underline{v}$$

15
$$\underline{y}_{j,r} = \underline{H} (\underline{\Phi}(t_{j2},T) - \underline{\Phi}(t_{j1},T)) \underline{x} + \underline{v}$$

avec les index v et r pour "en avant" et "en arrière" dans le temps et

$$\underline{H} = \begin{pmatrix} \underline{0} & \underline{0} & \underline{I} & \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix} = \text{matrice de mesurage}$$

et servent à l'estimation optimale des données ;

20 - de là, deux fonctions de temps des erreurs de système estimées de manière optimale $\underline{\hat{x}}_v$ et $\underline{\hat{x}}_r$ sont, en partant du début et de la fin du mesurage, calculées comme bases pour une fonction commune de temps $\underline{\hat{x}}$ obtenue par moyenne pondérée ;

25 - une correction du mesurage est effectuée à l'aide de cette fonction de temps de l'erreur de système.

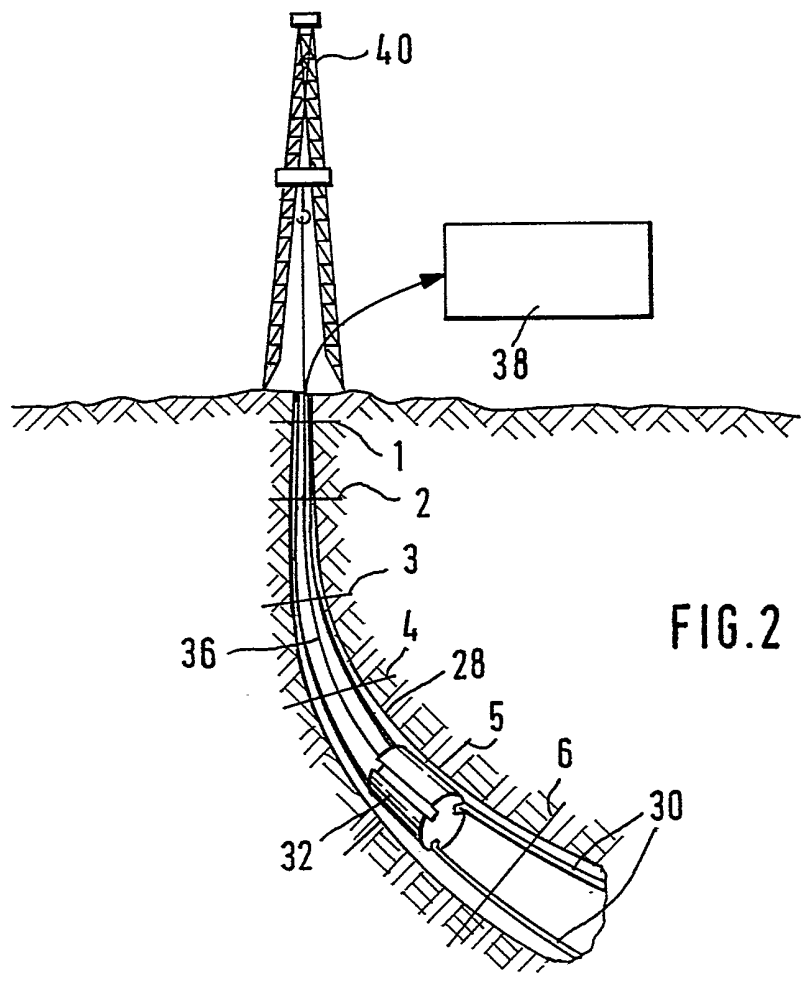
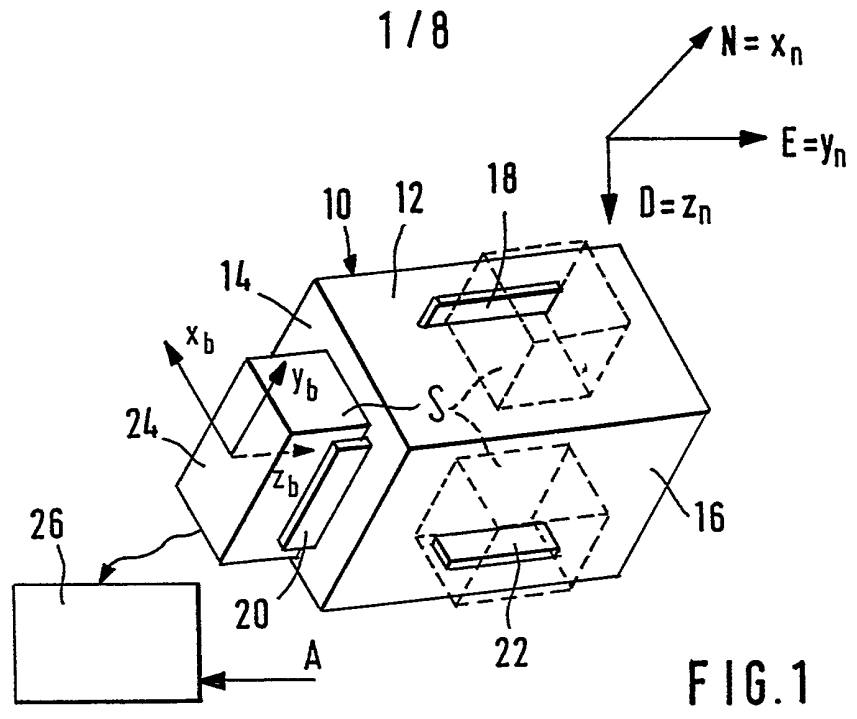
7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'aux points fixes, les mesures de position sont complétées par des mesures de vitesse et que l'exploitation des données est fondée sur la matrice de mesure suivante :

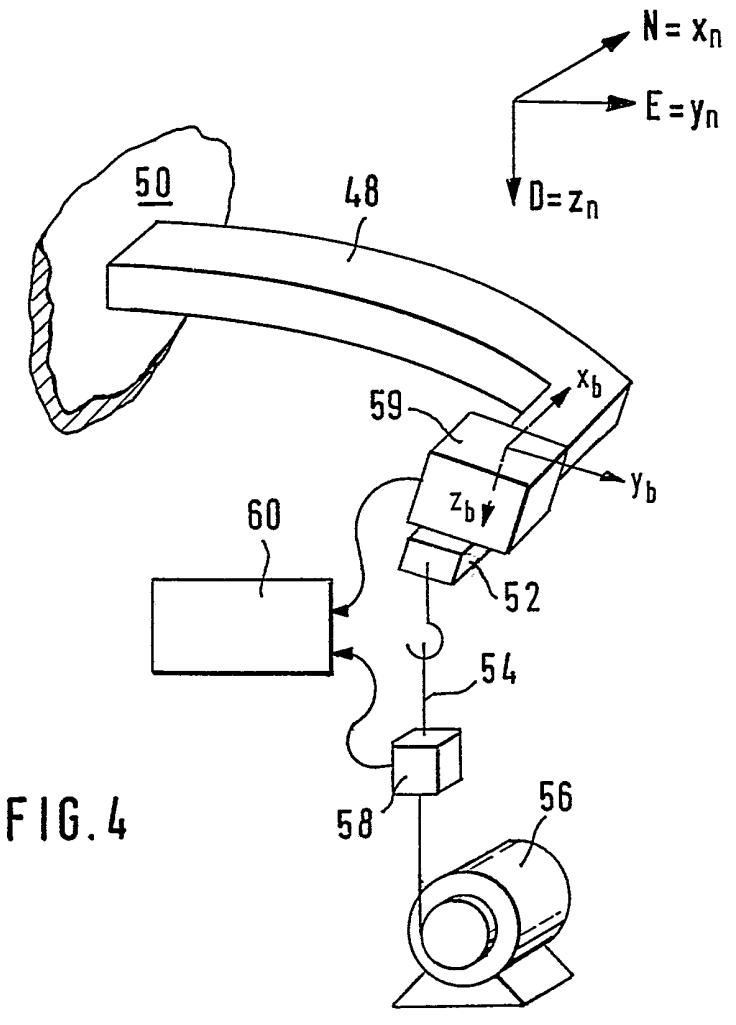
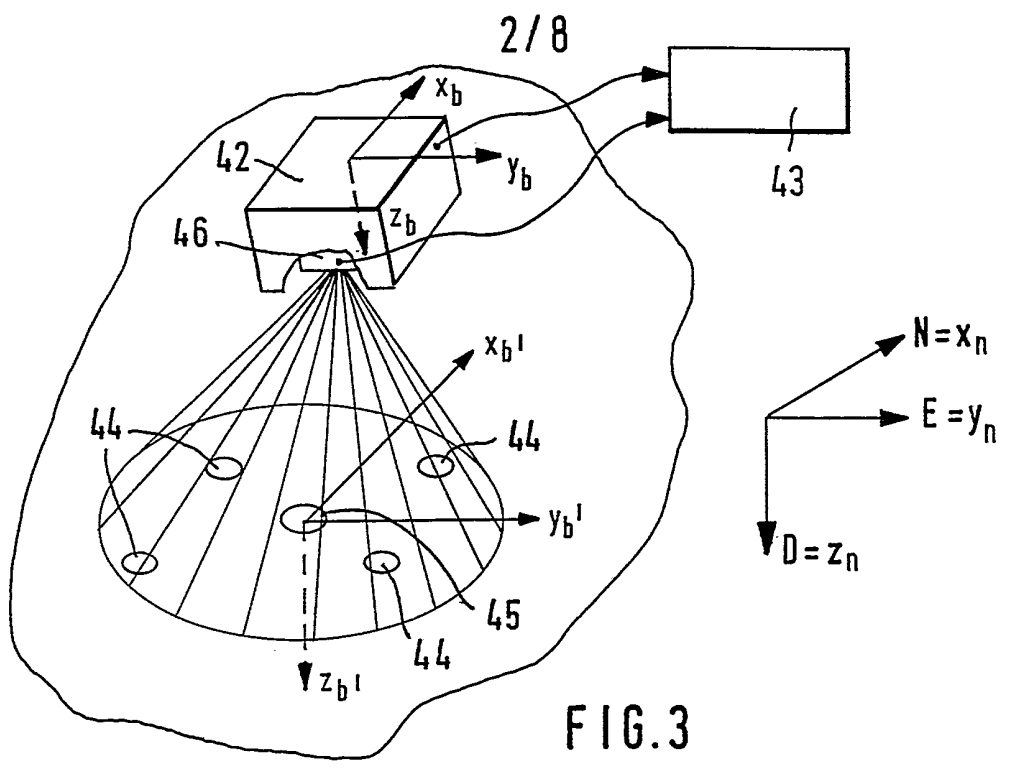
30
$$\underline{H} = \begin{pmatrix} \underline{0} & \underline{I} & \underline{I} & \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix}.$$

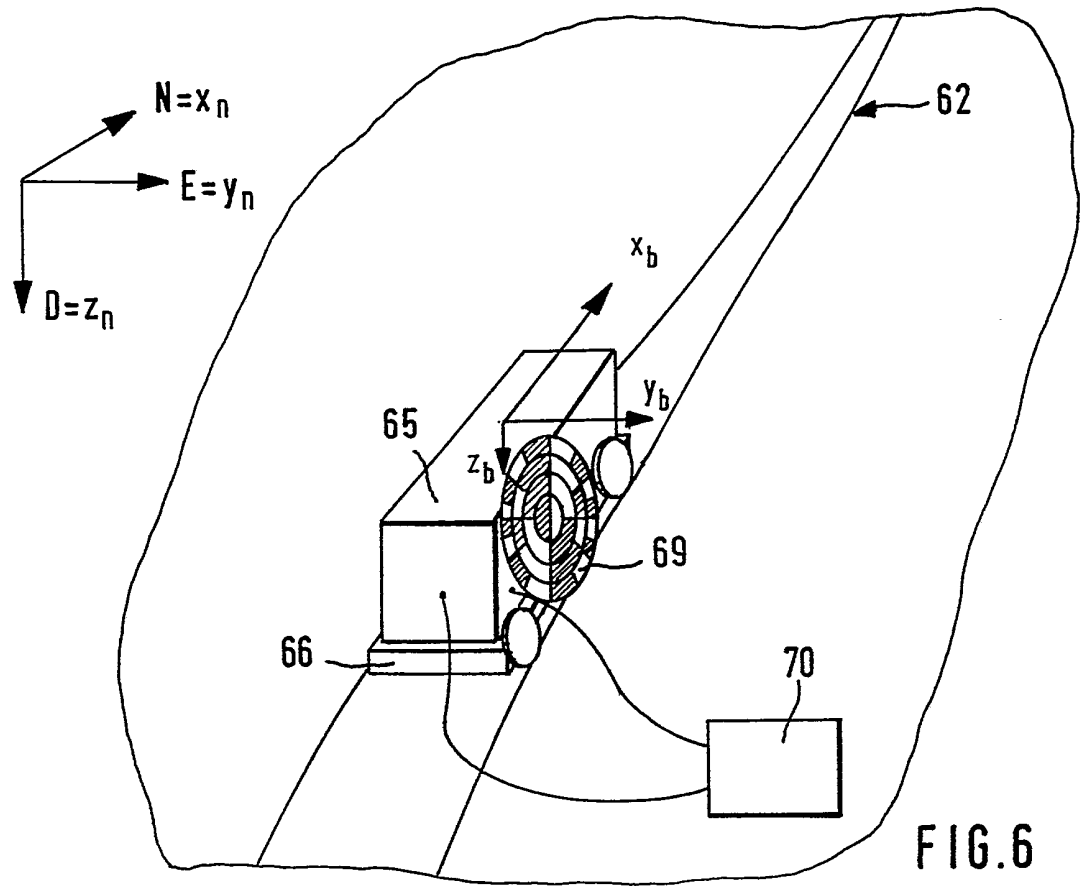
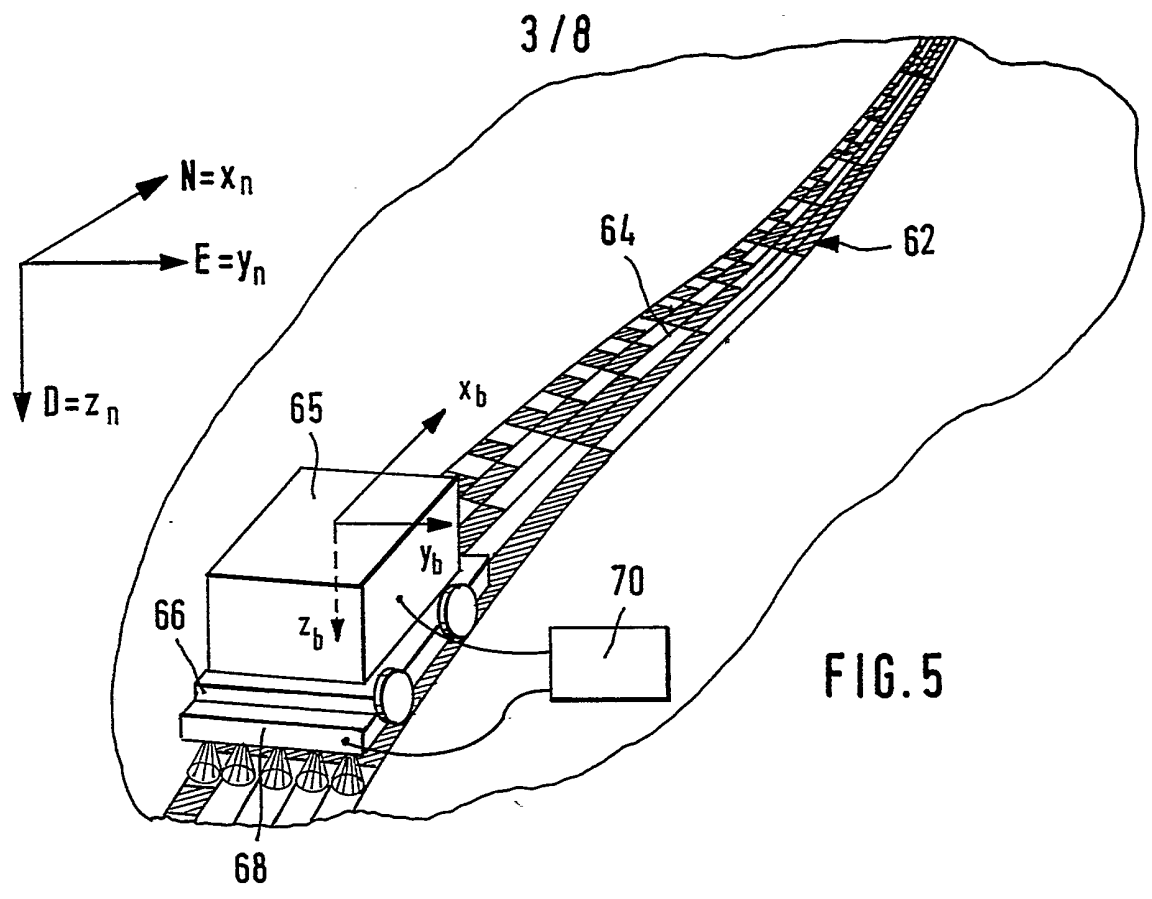
8. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'aux points fixes, les mesures de position sont complétées par des mesures angulaires par rapport aux mêmes directions
35 de référence et que l'exploitation des données est fondée sur

la matrice de mesure suivante :

$$\underline{\underline{H}} = (\underline{\underline{I}} \quad \underline{\underline{0}} \quad \underline{\underline{I}} \quad \underline{\underline{0}} \quad \underline{\underline{0}} \quad \underline{\underline{0}}).$$







4/8

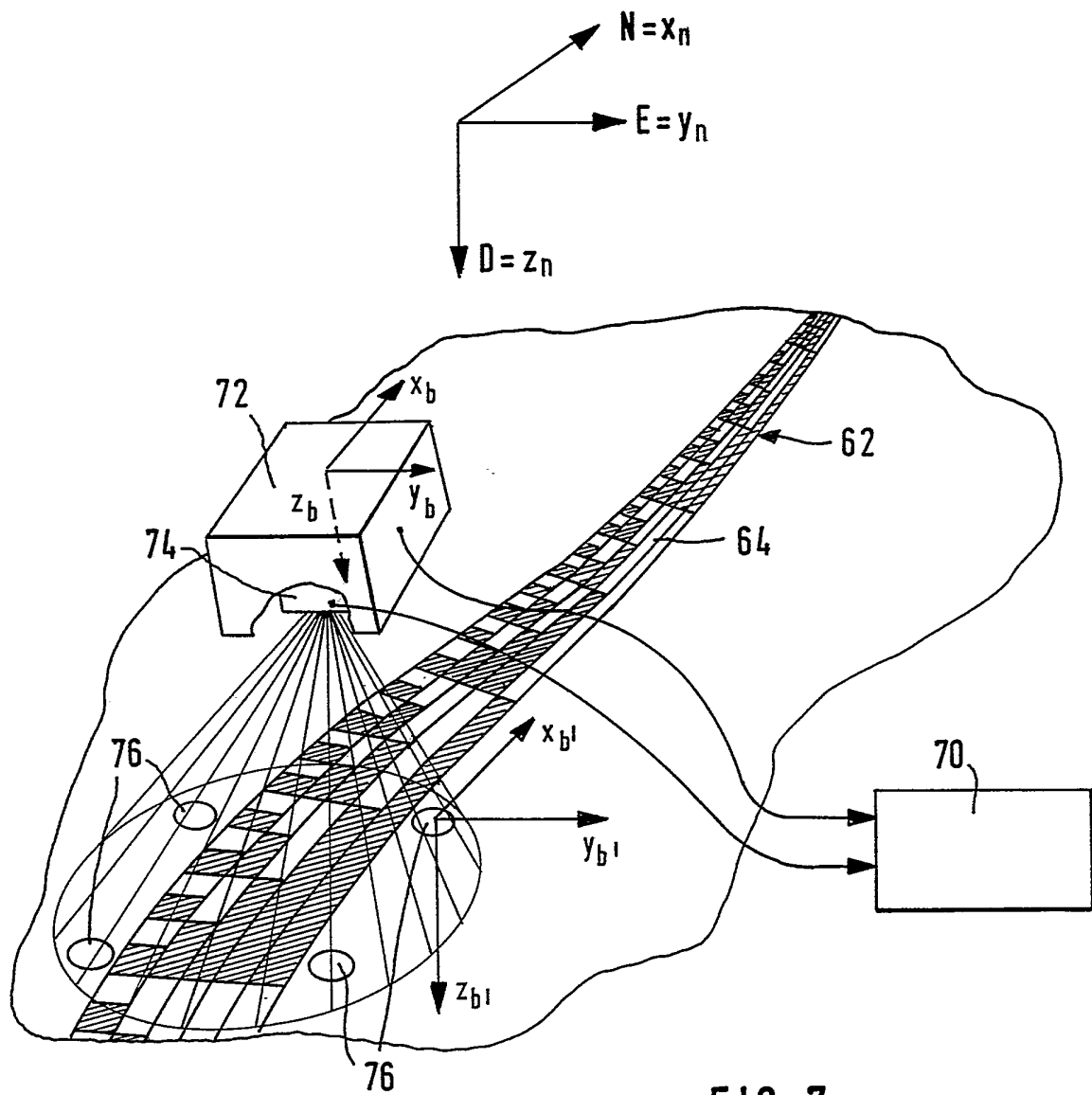
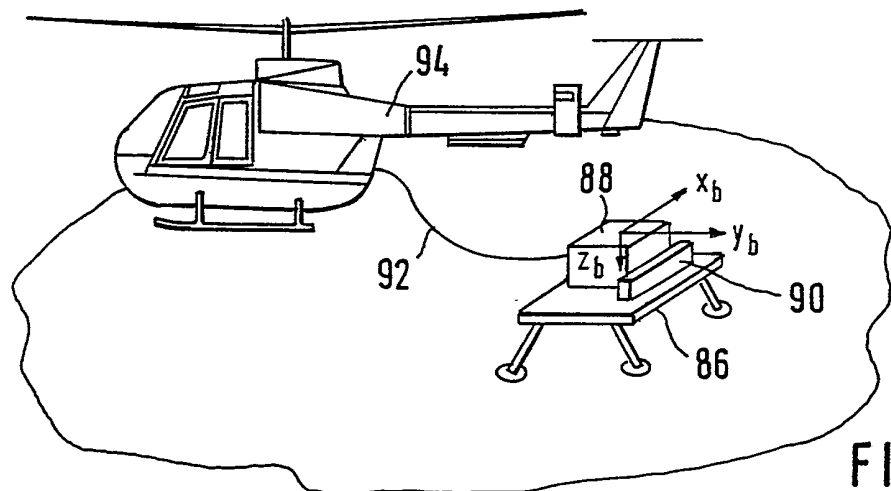
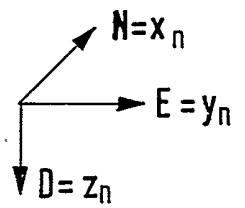
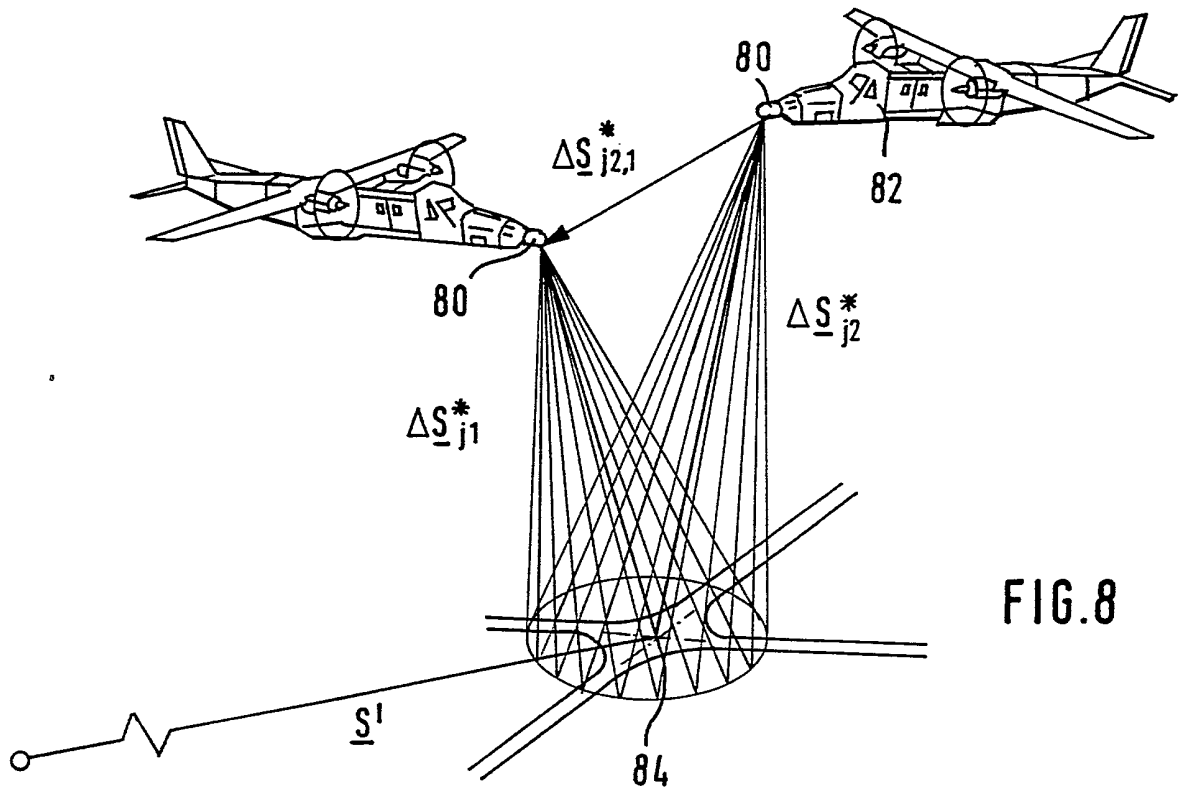


FIG. 7

5 / 8



6/8

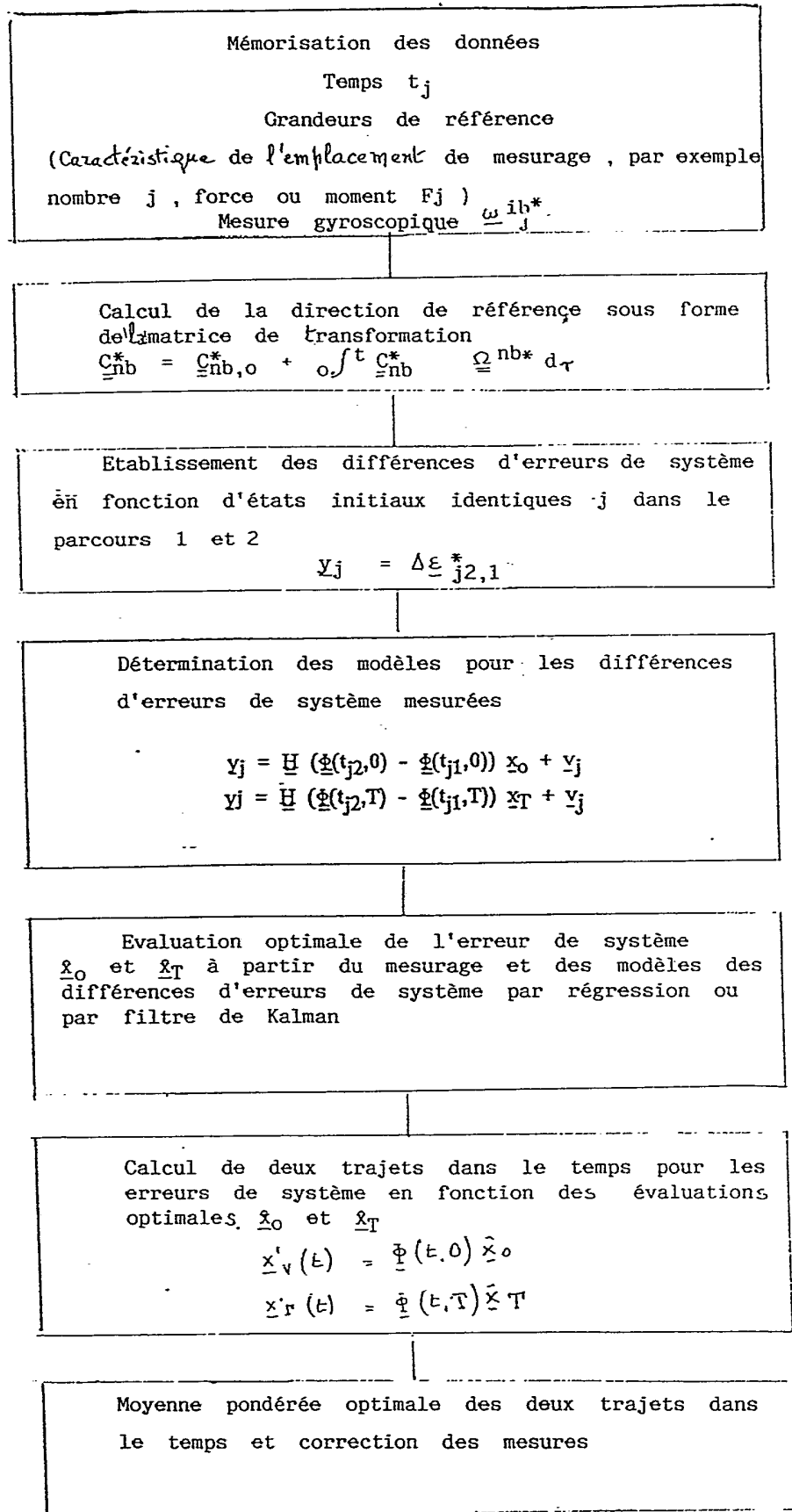


FIG. 10

7/8

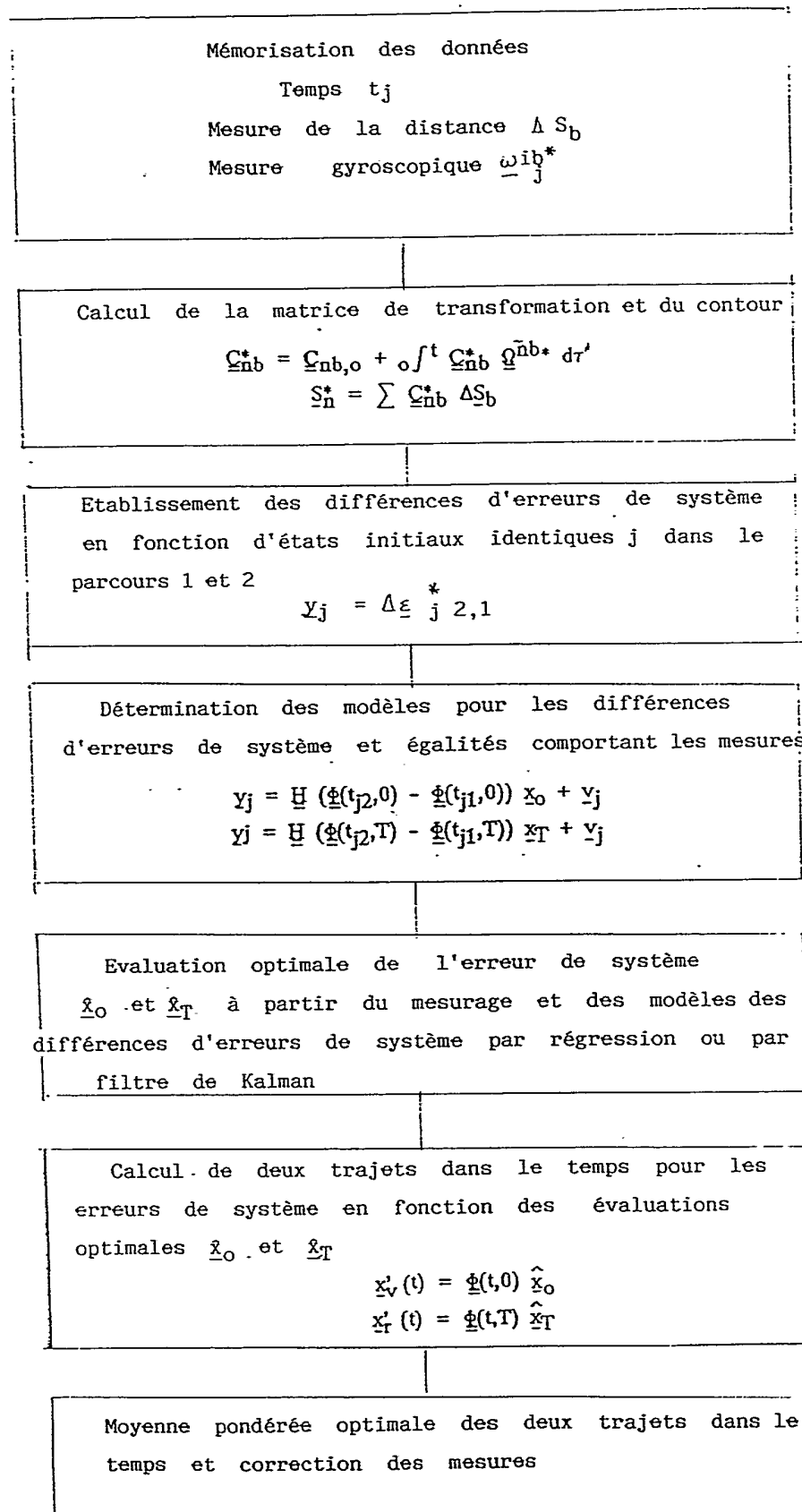


FIG. 11

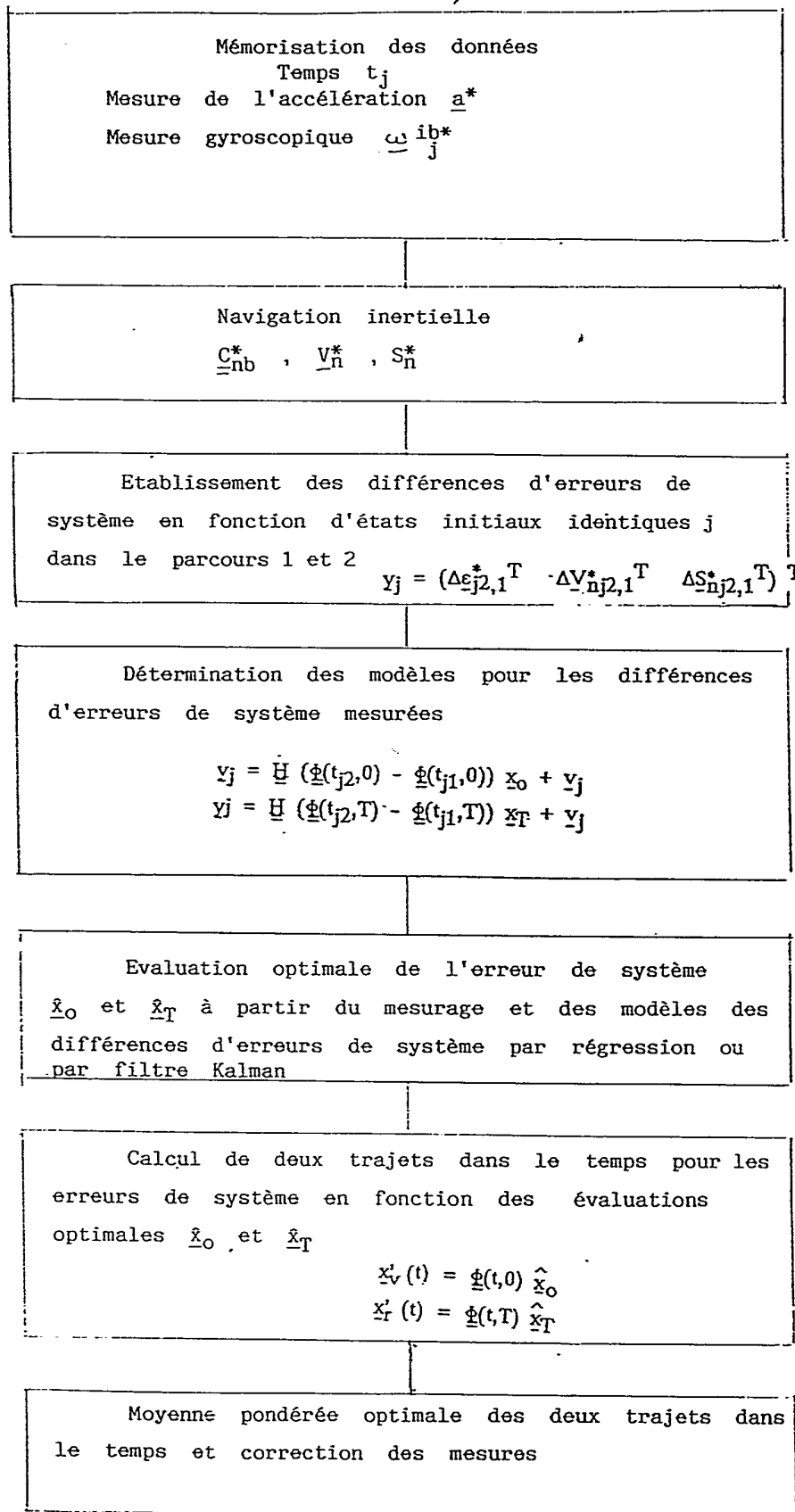


FIG. 12