

(19)



(11)

EP 2 463 844 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
13.06.2012 Bulletin 2012/24

(51) Int Cl.:
G08G 5/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **11191207.7**

(22) Date de dépôt: **29.11.2011**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
 GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
 PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
 Etats d'extension désignés:
BA ME

(72) Inventeurs:
 • **Giovannini, Andrea**
31300 Toulouse (FR)
 • **Pastre, Thomas**
69300 Caluire et Cuire (FR)

(30) Priorité: **07.12.2010 FR 1060191**

(74) Mandataire: **Gevers France**
23bis, rue de Turin
75008 Paris (FR)

(71) Demandeur: **AIRBUS OPERATIONS (SAS)**
31060 Toulouse (FR)

(54) **Procédé et dispositif pour construire une trajectoire de vol optimale destinée à être suivie par un aéronef**

(57) - Procédé et dispositif pour construire une trajectoire de vol optimale destinée à être suivie par un aéronef.
 - Le dispositif (1) comporte des moyens (8, 9) pour cons-

truire une trajectoire de vol optimale, qui est libre de toute collision avec des obstacles, qui respecte des contraintes énergétiques, et qui permet de relier la position courante de l'aéronef à un point cible défini par un opérateur.

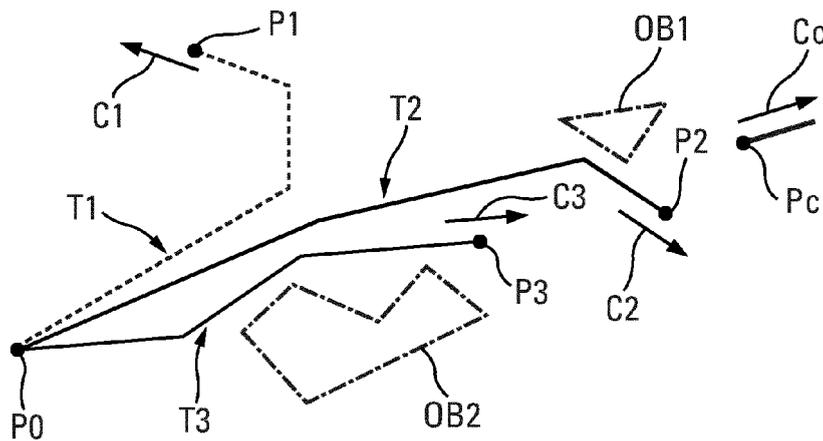


Fig. 4

EP 2 463 844 A1

Description

[0001] La présente invention concerne un procédé et un dispositif pour construire une trajectoire de vol optimale destinée à être suivie par un aéronef, en particulier un avion de transport.

[0002] Plus particulièrement, la présente invention a pour objet de générer, à l'aide de moyens embarqués, des trajectoires optimisées en temps réel, qui sont volables dans des environnements dynamiques contraints, c'est-à-dire dans des environnements qui sont susceptibles de contenir des objets (ou obstacles), avec lesquels l'aéronef doit éviter d'entrer en collision, et notamment des objets mobiles tels que des zones de perturbations météorologiques, par exemple des zones orageuses, ou d'autres aéronefs.

[0003] On sait que la gestion de la trajectoire de vol d'un aéronef est, généralement, laissée à la charge d'un système embarqué de gestion de vol. La modification d'un plan de vol, notamment, est souvent un procédé compliqué, nécessitant des interactions multiples avec des systèmes de l'aéronef, dont le résultat final n'est pas totalement optimisé. Cela est notamment dû, d'une part aux difficultés et limitations inhérentes à l'utilisation des routes et procédures publiées, et d'autre part aux limitations des fonctions déjà existantes pour générer des trajectoires non publiées (par exemple « DIR TO »).

[0004] Actuellement, il n'existe pas de moyens embarqués permettant de générer, en temps réel, de manière simple, des trajectoires optimales, qui sont indépendantes des routes existantes et qui sont libres d'obstacles notamment de type dynamique.

[0005] La présente invention a pour objet de remédier à ces inconvénients. Elle concerne un procédé pour construire une trajectoire de vol optimale pour un aéronef, en particulier un avion de transport, qui est définie dans un environnement susceptible de contenir des obstacles (notamment mobiles), ladite trajectoire de vol comprenant une trajectoire latérale et une trajectoire verticale et étant définie entre un point courant et un point cible.

[0006] Selon l'invention, ledit procédé est remarquable en ce que, de façon automatique, à l'aide au moins d'une base de données relative à des obstacles et d'un profil vertical de référence, en tenant en compte d'un objectif fixé par un opérateur et indiquant au moins ledit point cible :

A/ on détermine au moins un premier tronçon de trajectoire de vol à partir dudit point courant, en réalisant les opérations successives suivantes :

- a) on engendre au moins un segment de droite de longueur prédéterminée débutant audit point courant ;
- b) on réalise un test de validation de chaque segment de droite ainsi engendré, un test de validation utilisant ladite base de données et ledit profil vertical de référence ;

c) on évalue chaque segment de droite engendré et validé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et

d) on enregistre, comme tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, chaque segment de droite, avec la note qui lui est attribuée ;

B/ on met en oeuvre un traitement itératif (ou une boucle itérative), comprenant les opérations successives suivantes :

a) parmi toutes les trajectoires virtuelles enregistrées, on prend en compte la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note par rapport à l'objectif fixé ;

b) on détermine des changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de cette trajectoire virtuelle ;

c) pour chacun des changements de cap possibles, on engendre un tronçon de trajectoire débutant à ladite extrémité aval et comprenant au moins l'un des éléments suivants : un arc de cercle et un segment de droite, pour lesquels on réalise un test de validation ;

d) pour chaque tronçon de trajectoire engendré et validé à l'étape c), on forme un nouveau tronçon de trajectoire de vol constitué de la trajectoire virtuelle prise en compte à l'étape a), suivie dudit tronçon de trajectoire ;

e) on évalue chaque nouveau tronçon de trajectoire ainsi formé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et

f) on enregistre chaque nouveau tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui est attribuée ;

la suite d'étapes a) à f) précédente étant répétée jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une répétition (desdites étapes a) à f) correspond audit point cible, cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale; et

C/ on transmet cette trajectoire de vol optimale à des moyens utilisateurs.

[0007] Les opérations décrites en A/ et B/ peuvent, en général, être implémentées dans les deux sens, c'est-à-dire de l'aéronef vers le point cible et vice-versa.

[0008] Ainsi, grâce à la présente invention, on engendre, en temps réel, une trajectoire de vol en 4D, qui présente les caractéristiques suivantes, comme précisé ci-après :

- elle est optimisée ;

- elle est libre de toute collision avec des obstacles environnants, notamment des obstacles mobiles ;
- elle respecte des contraintes énergétiques ; et
- elle représente une trajectoire de vol permettant de relier la position courante (ou point courant) de l'aéronef à un point cible défini par un opérateur, généralement le pilote de l'aéronef. Ce point cible peut, par exemple, correspondre au seuil de la piste choisie ou à un point fixe sur une procédure usuelle STAR ou APPR pour des utilisations en approche, ou bien à un point de rejointe d'un plan de vol initial.

[0009] Le procédé conforme à la présente invention diffère d'un traitement usuel réalisé par un système de gestion de vol, par sa capacité à proposer une trajectoire optimale indépendante des routes existantes, et par la simplicité des actions menant à la génération de la trajectoire, comme précisé ci-dessous. De plus, ledit procédé assure que la trajectoire obtenue est libre d'obstacles y compris dynamiques (tels qu'une cellule orageuse ou un aéronef), garantie que ne peut produire un système de gestion de vol.

[0010] En outre, la présente invention est capable de gérer les contraintes opérationnelles en vol en un temps minimal, et elle fournit par ailleurs des trajectoires volables optimisées, en se basant sur un traitement d'informations générées par le système de gestion de vol. Le traitement de ces informations permet l'intégration de contraintes complexes, sans gérer la complexité mathématique dans des algorithmes.

[0011] Ainsi, le procédé conforme à l'invention présente, notamment, les avantages suivants :

- il permet de soutenir l'équipage dans sa prise de décision à bord. Le procédé de génération de trajectoire vise à diminuer la charge de travail de l'équipage dans des situations jugées complexes à bord. Ces situations sont associées à une charge de travail importante du pilote, due notamment à un changement d'environnement (changement de piste en phase d'approche par exemple). Le procédé de génération de trajectoire intervient alors en prenant en charge la réflexion associée à la prise de décision concernant la trajectoire, le pilote intervenant comme opérateur de la fonction et pour valider le résultat. Le procédé engendre une trajectoire optimale, libre de tout obstacle et respectant des contraintes opérationnelles, qui est fournie à des moyens utilisateurs. Cette trajectoire optimale peut, notamment, être affichée sur un écran embarqué ou bien être transmise à un contrôleur aérien. Elle peut également être utilisée comme référence pour un guidage automatique ;
- il permet de valider une trajectoire. Le procédé de génération de trajectoire prend en compte, simultanément, une pluralité de contraintes (terrain, énergie, physique du vol ...). Les pilotes peuvent faire appel audit procédé de génération pour valider une

trajectoire qu'ils souhaitent suivre (mais dont ils ne peuvent assurer la validité à cause d'un environnement trop complexe) ; et

- il permet d'engendrer une trajectoire en intégrant les pilotes dans la boucle de génération. L'utilisation principale fait appel au procédé sans requérir des paramètres particuliers : le procédé engendre une trajectoire optimale en se basant sur des paramètres par défaut, associés à l'aéronef et à son environnement. L'équipage peut, cependant, orienter et imposer des contraintes particulières pour affiner la trajectoire ou mieux répondre à un besoin spécifique, par exemple générer une trajectoire avec une zone de couverture plus large que celle imposée par la précision de navigation, afin d'augmenter les marges de passage par rapport aux obstacles. Une telle mise en oeuvre peut être utilisée lors du contournement d'une cellule orageuse en déplacement par exemple, pour remédier aux variations de l'environnement.

[0012] Par ailleurs, de façon avantageuse, à l'étape A/a), on détermine l'altitude du segment de droite à l'aide dudit profil vertical de référence.

[0013] En outre, avantageusement, pour réaliser un test de validation d'un tronçon de trajectoire :

- on détermine une enveloppe de protection autour dudit tronçon de trajectoire, de préférence une enveloppe de protection relative à des performances de navigation requises de type RNP (« Required Navigation Performance » en anglais) ;
- on compare cette enveloppe de protection à des obstacles issus de ladite ou desdites bases de données relatives à des obstacles ; et
- on considère que ledit tronçon de trajectoire est validé si aucun obstacle ne se trouve dans ladite enveloppe de protection.

[0014] De plus, avantageusement, pour réaliser un test de validation d'un tronçon de trajectoire par rapport à des obstacles mobiles, on compare l'enveloppe de protection à des positions extrapolées de ces obstacles mobiles.

[0015] Par ailleurs, de façon avantageuse, pour évaluer un tronçon de trajectoire :

- on détermine la distance restant à parcourir à partir de l'extrémité aval dudit tronçon de trajectoire, pour rejoindre le point cible ;
- on détermine la différence de cap entre le cap à ladite extrémité aval et un cap cible audit point cible ; et
- on attribue une note audit tronçon de trajectoire, en fonction de ladite distance et de ladite différence de cap. Cette note illustre la capacité du tronçon de trajectoire à remplir l'objectif fixé, c'est-à-dire permettre à l'aéronef s'il suit ce tronçon de trajectoire de rejoindre rapidement ledit point cible tout en présentant

alors un cap proche du cap cible.

[0016] En outre, avantageusement, à l'étape B/b), pour déterminer les changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle, on prend en compte, à partir du cap courant à ladite extrémité aval, tous les caps successifs, suivant un pas prédéterminé, par exemple 10°, jusqu'à un cap maximal (par exemple 170° du cap courant), et ceci de part et d'autre dudit cap courant.

[0017] Par ailleurs, de façon avantageuse:

- à l'étape B/c), pour engendrer un tronçon de trajectoire:

c1) on engendre d'abord un arc de cercle en fonction de la vitesse à ladite extrémité aval, et on réalise un test de validation de cet arc de cercle; puis

c2) on engendre un segment de droite associé à cet arc de cercle, et on réalise un test de validation du tronçon de trajectoire formé de l'arc de cercle et du segment de droite ;

- à l'étape B/c1), on détermine un arc de cercle qui présente le rayon le plus petit qui est susceptible d'être suivi par l'aéronef volant à une vitesse prédite ; et/ou
- à l'étape B/c), un segment de droite est déterminé de manière similaire au segment de droite engendré à l'étape A/a).

[0018] La présente invention concerne également un dispositif pour construire une trajectoire de vol optimale pour un aéronef, en particulier un avion de transport, qui est définie dans un environnement susceptible de contenir des obstacles (notamment mobiles), ladite trajectoire de vol comprenant une trajectoire latérale et une trajectoire verticale et étant définie entre un point courant et un point cible.

[0019] Selon l'invention, ledit dispositif est remarquable en ce qu'il comporte :

- au moins d'une base de données relative à des obstacles;
- des premiers moyens permettant à un opérateur d'entrer un objectif indiquant au moins ledit point cible ;
- des deuxièmes moyens pour déterminer au moins un premier tronçon de trajectoire de vol à partir dudit point courant, lesdits deuxièmes moyens comprenant :

- un élément pour engendrer au moins un segment de droite de longueur prédéterminée débutant audit point courant ;

- un élément pour réaliser un test de validation de chaque segment de droite ainsi engendré,

un test de validation utilisant ladite base de données relative à des obstacles et un profil vertical de référence ;

- un élément pour évaluer chaque segment de droite engendré et validé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et

- un élément pour enregistrer, dans un moyen de stockage, chaque tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec sa note ;

- des troisièmes moyens pour mettre en oeuvre un traitement itératif, lesdits troisièmes moyens comprenant :

- un élément pour prendre en compte, parmi toutes les trajectoires virtuelles enregistrées dans le moyen de stockage, la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note par rapport à l'objectif fixé ;

- un élément pour déterminer des changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de cette trajectoire virtuelle ;

- un élément pour engendrer, pour chacun des changements de cap possibles, un tronçon de trajectoire débutant à ladite extrémité aval et comprenant au moins l'un des éléments suivants : un arc de cercle et un segment de droite, pour lesquels un test de validation est réalisé ;

- un élément pour former, pour chaque tronçon de trajectoire engendré et validé, un nouveau tronçon de trajectoire de vol constitué de ladite trajectoire virtuelle suivie dudit tronçon de trajectoire ;

- un élément pour évaluer chaque nouveau tronçon de trajectoire ainsi formé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et

- un élément pour enregistrer, dans le moyen de stockage, chaque nouveau tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui est attribuée ;

lesdits troisièmes moyens répétant la suite d'itérations précédentes jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une itération correspond audit point cible, cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale ; et

- des quatrièmes moyens pour transmettre cette trajectoire de vol optimale à des moyens utilisateurs.

[0020] Par conséquent, le dispositif conforme à l'invention permet de fournir rapidement une trajectoire de vol, en prenant en compte l'intégralité des besoins opérationnels associés à l'exploitation des aéronefs, sans

avoir recours à une discrétisation des références spatiales. En outre, avantageusement :

- lesdits moyens utilisateurs comprennent un écran de visualisation de l'aéronef, pour afficher ladite trajectoire de vol optimale ; et/ou
- lesdits quatrièmes moyens comprennent des moyens qui transmettent ladite trajectoire de vol optimale à des moyens externes audit dispositif, en particulier à des systèmes embarqués tels qu'un système de pilotage automatique par exemple ou à des moyens situés à l'extérieur de l'aéronef, notamment pour informer le contrôle aérien.

[0021] Par ailleurs, avantageusement, le dispositif conforme à l'invention comporte à la fois :

- une base de données du terrain, représentant des contraintes fixes;
- une base de données météo. Ces informations peuvent être issues de la surveillance météo à bord ou être reçues par l'intermédiaire d'une liaison usuelle de transmission de données ; et
- une base de données relatives aux aéronefs environnants, qui contient les plans de vol et les prédictions des aéronefs identifiés dans un périmètre donné.

[0022] En plus des informations issues desdites bases de données, le dispositif conforme à l'invention se fonde, notamment, sur les informations suivantes :

- un ensemble de paramètres configurés par le pilote ou laissés à des valeurs par défaut. La seule information indispensable pour la mise en oeuvre du procédé est le point cible (c'est-à-dire le point où le pilote souhaite que la trajectoire générée se termine). Ce point cible est défini par une position géométrique (latitude, longitude, altitude, cap), mais également potentiellement par des contraintes annexes (vitesse, configuration ...). Le point cible le plus courant en phase d'approche est le seuil de la piste ou un point de rejointe lors d'une procédure d'arrivée standard ; et
- un profil vertical engendré par le système de gestion de vol, qui fournit une référence de descente pour l'aéronef. Le profil vertical associé à chaque distance par rapport au point cible une altitude et une vitesse.

[0023] La présente invention concerne également un aéronef, en particulier un avion de transport, qui est muni d'un dispositif tel que celui précité.

[0024] Les figures du dessin annexé feront bien comprendre comment l'invention peut être réalisée. Sur ces figures, des références identiques désignent des éléments semblables.

[0025] La figure 1 est le schéma synoptique d'un dispositif conforme à l'invention.

[0026] Les figures 2 à 4 sont des graphiques permettant d'expliquer la génération conforme à l'invention d'une trajectoire de vol optimale.

[0027] Le dispositif 1 conforme à l'invention et représenté de façon schématique sur la figure 1, a pour objet la construction d'une trajectoire de vol TV destinée à être suivie par un aéronef (non représenté), en particulier un avion de transport, dans un environnement susceptible de contenir des obstacles (notamment mobiles). Ladite trajectoire de vol TV comprend une trajectoire latérale (ou horizontale) qui est définie dans un plan horizontal et une trajectoire verticale qui est définie dans un plan vertical. Elle est formée de manière à relier un point courant PO (correspondant à la position courante de l'aéronef) à un point cible Pc.

[0028] Selon l'invention, ledit dispositif 1 comporte :

- un ensemble 2 de base(s) de données 3 relative(s) à des obstacles;
- un ensemble 20 de sources d'informations, qui comprend notamment des moyens 4 permettant à un opérateur d'entrer dans le dispositif 1 un objectif indiquant au moins ledit point cible Pc ;
- une unité de traitement 5 qui est reliée par l'intermédiaire de liaisons 6 et 7 respectivement auxdits ensembles 2 et 20 et qui comprend des moyens 8 pour déterminer un premier tronçon de trajectoire de vol TO à partir du point courant PO, ainsi que des moyens 9 pour mettre en oeuvre une boucle itérative de manière à former (à l'aide dudit premier tronçon TO) la trajectoire de vol TV optimale ; et
- des moyens 10, 11 pour transmettre cette trajectoire de vol optimale TV à des moyens utilisateurs 12.

[0029] De plus, selon l'invention, lesdits moyens 8 comprennent:

- un élément 15 pour engendrer au moins un segment de droite de longueur prédéterminée, débutant audit point courant PO ;
- un élément 16 pour réaliser un test de validation de chaque segment de droite ainsi engendré, un test de validation utilisant ladite base de données 3 relative à des obstacles, ainsi qu'un profil vertical de référence ;
- un élément 17 pour évaluer chaque segment de droite engendré et validé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé par l'opérateur, notamment un pilote de l'aéronef ; et
- un élément 18 pour enregistrer, dans un moyen de stockage 19 (mémoire) usuel, comme tronçon de trajectoire de vol T0 qui illustre une trajectoire virtuelle, chaque segment de droite ainsi obtenu, avec la note qui lui est attribuée.

[0030] En outre, selon l'invention, lesdits moyens 9 comprennent :

- un élément 21 pour prendre en compte, parmi toutes les trajectoires virtuelles enregistrées dans le moyen de stockage 19, la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note par rapport à l'objectif fixé ;
- un élément 22 pour déterminer des changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de cette trajectoire virtuelle ;
- un élément 23 pour engendrer, pour chacun des changements de cap possibles, un tronçon de trajectoire débutant à ladite extrémité aval et comprenant au moins l'un des éléments suivants : un arc de cercle RF et un segment de droite TF, pour lesquels un test de validation est réalisé ;
- un élément 24 pour former, pour chaque tronçon de trajectoire engendré et validé, un nouveau tronçon de trajectoire de vol constitué de ladite trajectoire virtuelle suivie dudit tronçon de trajectoire ;
- un élément 25 pour évaluer chaque nouveau tronçon de trajectoire ainsi formé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé par l'opérateur ; et
- un élément 26 pour enregistrer, dans le moyen de stockage 19, chaque nouveau tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui est attribuée.

[0031] De plus, lesdits moyens 9 répètent la suite d'itérations précédentes (desdits éléments 21 à 26) jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une itération correspond audit point cible Pc, cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale TV.

[0032] Le dispositif 1 conforme à l'invention permet, ainsi, de générer une trajectoire optimale TV respectant des paramètres de configuration du pilote et des contraintes énergétiques. La trajectoire est construite d'après une structure RNP (succession de segments « Track to Fix » et « Radius to Fix » tels que définis dans ARINC424, et nommés TF et RF dans la présente description). La génération de trajectoire n'intègre pas de lois de guidage ou de gestion énergétique directement dans le traitement : le respect de ces contraintes se fait à travers l'intégration du profil vertical en entrée (produit par le système de gestion de vol) et l'intégration des règles de transition du système de gestion de vol. Cette approche permet au dispositif 1 de générer des trajectoires volables sans surcharger les fonctions avec des données lourdes à traiter.

[0033] Ledit dispositif 1 suit une logique itérative, en analysant depuis un point donné les positions potentielles où l'aéronef peut aller en respectant les contraintes imposées par le pilote (via les moyens 4). Le dispositif 1 analyse les différentes positions potentielles (dites virtuelles), leur attribue une note grâce à une fonction d'évaluation interne, et les trie dans une liste regroupant l'intégralité desdites positions virtuelles. A l'itération suivante, le dispositif 1 récupère la meilleure position virtuelle connue (meilleure note dans la liste) et réitère la boucle

(analyse des positions adjacentes potentielles, validation des segments de trajectoire produits, notation de la nouvelle position virtuelle et insertion dans la liste). La boucle de recherche cesse lorsque le dispositif 1 considère avoir trouvé la meilleure solution.

[0034] Des critères ultérieurs peuvent, si nécessaire, être intégrés dans le calcul de la note, par exemple la valeur de la composante du vent le long du tronçon de trajectoire (si connue ou estimée).

[0035] La fonction mise en oeuvre par le dispositif 1 se base sur une représentation discrète de l'environnement de recherche.

[0036] De préférence, l'ensemble 2 de bases de données 3 du dispositif 1 comporte simultanément :

- une base de données du terrain, représentant des contraintes fixes ;
- une base de données météo. Ces informations peuvent être issues de la surveillance météo à bord ou être reçues par l'intermédiaire d'une liaison usuelle de transmission de données ; et
- une base de données relatives aux aéronefs environnants, qui contient les plans de vol et les prédictions des aéronefs identifiés dans un périmètre donné.

[0037] Le dispositif 1 se réfère donc à deux types de bases de données, traitées séparément :

- une base de données fixes, représentant des obstacles dont la position n'évolue pas pendant le vol. Cette base contient des discrétisations des obstacles. La représentation est une projection au sol, polygonale, associée à une hauteur limite ; et
- des bases dynamiques représentant l'intégralité des obstacles en déplacement que l'opérateur souhaite prendre en compte dans son évaluation. Les bases dynamiques intègrent des informations supplémentaires concernant l'évolution des zones. Pour les zones orageuses, les informations sont produites par analyse de l'évolution récente des zones (analyse de la surveillance météo ou de données transmises par liaison de transmission de données par exemple). La base de données météo représente une zone à risque discrète associée à une cellule nuageuse détectée par la surveillance. A chaque point de construction de la zone à risque est associé un vecteur de déplacement calculé sur l'évolution du point pendant les dernières minutes d'observation.

[0038] En plus des informations issues desdites bases de données 3, le dispositif 1 conforme à l'invention se fonde, notamment, sur les informations suivantes :

- un ensemble de paramètres configurés par le pilote (à l'aide des moyens 4) ou laissés à des valeurs par défaut. La seule information indispensable pour la mise en oeuvre de l'invention est le point cible Pc

(c'est-à-dire le point où le pilote souhaite que la trajectoire générée se termine). Ce point cible Pc est défini par une position géométrique (latitude, longitude, altitude, cap), mais également potentiellement par des contraintes annexes (vitesse, configuration ...). Le point cible Pc le plus courant en phase d'approche est le seuil de la piste ou un point de rejointe lors d'une procédure d'arrivée standard ; et

- un profil vertical engendré par le système de gestion de vol, qui fournit une référence de descente pour l'aéronef. Le profil vertical (reçu par exemple par la liaison 7) associe, à chaque distance par rapport au point cible Pc, une altitude et une vitesse.

[0039] En outre :

- lesdits moyens utilisateurs 12 comprennent un écran de visualisation 13, sur lequel peut être affichée ladite trajectoire de vol optimale TV ; et
- les moyens 11 peuvent transmettre la trajectoire de vol optimale TV à des moyens externes au dispositif 1, en particulier à des systèmes embarqués tels qu'un système de pilotage automatique par exemple, ou bien à des moyens situés à l'extérieur de l'aéronef, notamment pour informer le contrôle aérien (par exemple via une liaison usuelle de transmission de données).

[0040] Le premier tronçon de trajectoire T0 généré par l'unité de traitement 5 est composé uniquement d'un segment TF. L'élément 15 dessine la projection sol du segment TF en fonction des paramètres d'interception. Les points de construction ne renseignent ni la vitesse, ni l'altitude sur le segment généré à ce stade de la construction. L'analyse du profil vertical par une sous-fonction permet de déduire l'altitude associée à chaque point de construction du segment TF. Il en est de même pour la prédiction de vitesse. Une fois le segment virtuel tracé en 3D, l'élément 15 engendre autour de la trajectoire TV une enveloppe de protection 27 relative à des performances de navigation requises de type RNP (« Required Navigation Performance » en anglais), comme représenté sur la figure 2.

[0041] L'enveloppe de protection 27 est définie autour de la trajectoire TV, tant sur le plan horizontal (figure 2 : largeur D) que sur le plan vertical.

[0042] L'élément 16 teste ensuite une collision 3D entre cette enveloppe de protection 27 et les obstacles fixes OB connus et stockés dans une base de données. La détection de collision 4D avec les zones dynamiques se fait par extrapolation linéaire de positions, basée sur les vecteurs stockés dans la base de données correspondante. L'élément 16 considère que ledit tronçon de trajectoire TF est validé si aucun obstacle OB ne se trouve dans ladite enveloppe de protection 27.

[0043] Dans le cas où un tronçon de trajectoire est validé, l'élément 17 procède à l'évaluation de la nouvelle

position virtuelle associée au segment TF validé. Il s'agit d'une fonction qui analyse l'intérêt d'une position virtuelle par rapport à l'objectif fixé par le pilote. Dans le cas d'une optimisation en distance parcourue, la fonction évalue la distance parcourue pour rejoindre la position virtuelle évaluée et estime la distance restant à parcourir pour rejoindre le point cible Pc. Cette estimation est basée sur une mesure de la distance entre le point virtuel et le point cible Pc. De préférence, l'évaluation d'un tronçon de trajectoire ne se rapporte pas uniquement à la distance, mais également à la convergence des caps entre le cap courant et le cap cible Cc (au point cible Pc), ce facteur pondérant l'estimation globale. L'addition de ces deux valeurs donne une note globale sans unité qui représente l'intérêt de la position considérée, comme précisé ci-dessous.

[0044] Ensuite, l'élément 18 enregistre, dans le moyen de stockage 19, ce tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui a été attribuée par l'élément 17.

[0045] Une fois ce premier élément virtuel T0 créé, les moyens 9 mettent en oeuvre la boucle de traitement itératif. Cette boucle est active tant que les moyens 9 n'ont pas engendré de trajectoire jugée optimale par la fonction d'évaluation.

[0046] Les moyens 9 suivent donc une logique de traitement itératif. A chaque passage de la boucle, ils cherchent (à l'aide de l'élément 21) la meilleure position qui a été générée jusque-là et analysent les possibilités de propagation depuis cette position. Lesdites possibilités de propagation représentent toutes les positions futures où peut se trouver l'aéronef à une itération n+1 depuis sa position courante à une itération n.

[0047] Pour ce faire, l'élément 21 parcourt donc le moyen de stockage 19 pour y récupérer la meilleure note. Cette note est associée à une trajectoire incomplète et une position virtuelle courante. Cette position virtuelle va servir de référence pendant toute l'itération de la boucle, comme point de départ de la propagation.

[0048] Ensuite, l'élément 22 analyse les changements de cap possibles (en fonction des paramètres de configuration du pilote) au point récupéré par l'élément 21, de préférence sous forme d'une discrétisation des changements de cap potentiels. A titre d'exemple, on peut utiliser une discrétisation de 10° pour le changement de cap. L'opérateur peut également définir, à l'aide des moyens 20, les changements de cap minimal et maximal qu'il souhaite mettre en oeuvre sur une trajectoire. Ainsi, l'analyse des changements de cap possibles consiste à observer les possibilité de déplacement en prenant en compte ces paramètres. A titre d'exemple, pour une configuration de discrétisation à 10° et un changement de cap maximal de 170°, l'élément 22 identifie 35 cas différents (-170°, -160°, ..., -10°, 0, +10°, +20°, ..., +160°, +170°), comme représenté sur la figure 3.

[0049] Par conséquent, pour déterminer les changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle (présentant la meilleure note), l'élé-

ment 22 prend en compte, à partir du cap courant à ladite extrémité aval, tous les caps successifs, suivant un pas prédéterminé, par exemple 10°, et ceci jusqu'à un cap maximal (par exemple 170° du cap courant). Cette prise en compte est réalisée de part et d'autre dudit cap courant.

[0050] A chaque changement de cap potentiel est associée une nouvelle bifurcation de la trajectoire. Les étapes suivantes sont mises en oeuvre pour chacun des changements de cap acceptables.

[0051] Pour chacun de ces changements de cap, l'élément 23 comprend des moyens pour réaliser les opérations successives suivantes, précisées davantage ci-après :

- génération d'un segment RF en fonction de la prédiction de vitesse au point courant :

- génération d'un segment RF 2D ;
- mise à jour des informations de vitesse et d'altitude sur le segment RF, basées sur le profil vertical ;
- génération d'enveloppes de protection RNP sur le segment RF;
- tests de collision 4D ; et
- validation du segment RF ; et

- génération d'un segment TF associé au segment RF validé :

- génération d'un segment TF 2D ;
- mise à jour des informations de vitesse et d'altitude;
- génération d'enveloppes de protection RNP sur le segment TF;
- tests de collision 4D ; et
- validation du segment TF.

[0052] Pour former un nouveau tronçon de trajectoire, l'élément 23:

- engendre donc d'abord un arc de cercle RF en fonction de la vitesse à ladite extrémité aval, et réalise un test de validation de cet arc de cercle RF. De préférence, l'élément 23 détermine un arc de cercle RF qui présente le rayon le plus petit susceptible d'être suivi par l'aéronef volant à une vitesse prédite ; puis
- engendre un segment de droite TF associé à cet arc de cercle RF, et réalise un test de validation du tronçon de trajectoire formé de l'arc de cercle RF suivi du segment de droite TF.

[0053] A chaque point récupéré dans le moyen de stockage 19 (par exemple le point P4 de la figure 3) est associé une prédiction de vitesse et une position géométrique (3D). La prédiction de vitesse permet donc à l'élément 23 de générer un rayon de virage adapté à la

vitesse estimée, afin que l'aéronef puisse voler le long du segment RF considéré. L'élément 23 crée l'arc de cercle RF le plus adapté (à savoir de préférence le plus petit volable) à la vitesse prédite.

5 **[0054]** Le segment RF est d'abord formé en 2D par l'élément 23. Les informations relatives au profil vertical permettent le calcul des altitudes en chaque point de la courbe. L'élément 23 forme ensuite l'enveloppe de protection de type RNP pour le segment RF. Des tests de collision 3D et 4D sont réalisés sur une discrétisation surprotectrice de la surface associée au segment RF en cours de génération.

10 **[0055]** La phase suivante de génération d'un segment TF est identique à celle mise en oeuvre par l'élément 15. L'élément 23 génère un segment TF partant du point de fin du segment RF validé. Le segment TF est construit, testé et validé.

15 **[0056]** A ce stade de l'itération, les trajectoires virtuelles générées par l'algorithme et stockées dans le moyen de stockage 19 présentent la structure (changements de cap de -170° à +170°) représentée sur la figure 3.

20 **[0057]** L'élément 25 réalise une évaluation de la position virtuelle associée à la combinaison RF-TF (point P5 avec un changement de cap de +20° pour l'exemple de la figure 3). La nouvelle position est notée par la fonction d'évaluation et stockée dans le moyen de stockage 19.

25 **[0058]** L'exemple de la figure 4 montre, à titre d'illustration, une situation avec trois trajectoires virtuelles T1, T2 et T3 (qui doivent éviter des obstacles OB1 et OB2). Dans ce cas :

- la trajectoire virtuelle T1 présente la note la moins bonne, ce qui est notamment dû au fait que l'extrémité aval P1 (avec un cap C1) est loin de l'objectif (point cible Pc) malgré le fait que le trajet déjà parcouru soit long ;
- la trajectoire virtuelle T2 présente une note intermédiaire, car elle se trouve plus proche du but (point cible Pc) et a suivi une trajectoire quasiment directe. Cependant, en raison de l'obstacle OB1, l'élément 25 analyse les possibilités de contournement, et T2 présente un cap C2 (à l'extrémité aval P2) qui est divergeant par rapport au point cible Pc ; et
- la trajectoire virtuelle T3 présente la meilleure note. Bien que l'extrémité aval P3 soit encore loin du point cible Pc, la prise en compte simultanément de la distance parcourue, de l'estimation de la distance restante et de son cap C3 font que l'élément 25 estime que la trajectoire virtuelle T3 est la plus intéressante.

30 **[0059]** La boucle principale de génération est terminée après l'insertion de cette nouvelle position dans le moyen de stockage 19. Lors de l'itération suivante de la boucle, les moyens 9 vérifient si la position virtuelle la mieux notée (parmi celles stockées) correspond au point cible Pc entré par le pilote. Si tel est le cas, les moyens 9 arrêtent la boucle principale puisque la trajectoire virtuelle relie

alors le point P0 au point cible Pc.

[0060] Les moyens 9 répètent donc la suite d'itérations précédentes jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une itération correspond audit point cible Pc, cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale TV. 5

[0061] Par conséquent, le dispositif 1 conforme à la présente invention engendre, en temps réel, une trajectoire de vol TV en 4D, qui présente les caractéristiques suivantes: 10

- elle est optimisée ;
- elle est libre de toute collision avec des obstacles OB, OB1 , OB2 environnants, notamment des obstacles mobiles; 15
- elle respecte des contraintes énergétiques ; et
- elle représente une trajectoire de vol permettant de relier la position courante (ou point courant P0) de l'aéronef à un point cible Pc défini par un opérateur, généralement le pilote de l'aéronef. Ce point cible Pc peut, par exemple, correspondre au seuil de la piste choisie ou à un point fixe sur une procédure usuelle STAR ou APPR pour des utilisations en approche, ou bien à un point de rejointe d'un plan de vol initial. 20 25

[0062] Comme indiqué ci-dessus, la trajectoire de vol optimale TV ainsi obtenue peut, notamment, être affichée sur un écran 13 embarqué ou être transmise à un contrôleur aérien. Elle peut également être utilisée comme référence pour un guidage automatique. 30

Revendications 35

1. Procédé pour construire une trajectoire de vol optimale pour un aéronef, en particulier un avion de transport, ladite trajectoire de vol (TV) comprenant une trajectoire latérale et une trajectoire verticale et étant définie entre un point courant (P0) et un point cible (Pc), 40
caractérisé en ce que, de façon automatique, à l'aide au moins d'une base de données (3) relative à des obstacles (OB) et d'un profil vertical de référence, en tenant en compte d'un objectif fixé par un opérateur et indiquant au moins ledit point cible (Pc) : 45

A/ on détermine au moins un premier tronçon de trajectoire de vol à partir dudit point courant (P0), en réalisant les opérations successives suivantes : 50

- a) on engendre au moins un segment de droite de longueur prédéterminée débutant audit point courant (P0); 55
- b) on réalise un test de validation de chaque segment de droite ainsi engendré, un test

de validation utilisant ladite base de données (3) et ledit profil vertical de référence ;
 c) on évalue chaque segment de droite engendré et validé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et
 d) on enregistre, comme tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, chaque segment de droite, avec la note qui lui est attribuée ;

B/ on met en oeuvre un traitement itératif, comprenant les opérations successives suivantes :

- a) parmi toutes les trajectoires virtuelles enregistrées, on prend en compte la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note par rapport à l'objectif fixé ;
- b) on détermine des changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de cette trajectoire virtuelle ;
- c) pour chacun des changements de cap possibles, on engendre un tronçon de trajectoire débutant à ladite extrémité aval et comprenant au moins l'un des éléments suivants : un arc de cercle (RF) et un segment de droite (TF), pour lesquels on réalise un test de validation;
- d) pour chaque tronçon de trajectoire engendré et validé à l'étape c), on forme un nouveau tronçon de trajectoire de vol constitué de la trajectoire virtuelle prise en compte à l'étape a), suivie dudit tronçon de trajectoire ;
- e) on évalue chaque nouveau tronçon de trajectoire ainsi formé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et
- f) on enregistre chaque nouveau tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui est attribuée ; la suite d'étapes a) à f) précédente étant répétée jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une répétition correspond audit point cible (Pc), cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale (TV) ; et

C/ on transmet cette trajectoire de vol optimale (TV) à des moyens utilisateurs (12).

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**à l'étape A/a), on détermine l'altitude du segment de droite à l'aide dudit profil vertical de référence.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2,

caractérisé en ce que, pour réaliser un test de validation d'un tronçon de trajectoire :

- on détermine une enveloppe de protection (27) autour dudit tronçon de trajectoire; 5
- on compare cette enveloppe de protection (27) à des obstacles (OB) issus de ladite base de données (3) relative à des obstacles ; et
- on considère que ledit tronçon de trajectoire est validé si aucun obstacle (OB) ne se trouve dans ladite enveloppe de protection (27). 10

4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce que**, pour réaliser un test de validation d'un tronçon de trajectoire par rapport à des obstacles mobiles, on compare l'enveloppe de protection (27) à des positions extrapolées de ces obstacles mobiles. 15

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** pour évaluer un tronçon de trajectoire (T1, T2, T3) : 20

- on détermine la distance restant à parcourir à partir de l'extrémité aval (P1, P2, P3) dudit tronçon de trajectoire (T1, T2, T3), pour rejoindre ledit point cible (Pc) ; 25
- on détermine la différence de cap entre le cap (C1, C2, C3) à ladite extrémité aval (P1, P2, P3) et un cap cible (Cc) audit point cible (Pc) ; et 30
- on attribue une note audit tronçon de trajectoire (T1, T2, T3), en fonction de ladite distance et de ladite différence de cap.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**à l'étape B/b), pour déterminer les changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle, on prend en compte, à partir du cap courant à ladite extrémité aval, tous les caps successifs, suivant un pas prédéterminé, jusqu'à un cap maximal, et ceci de part et d'autre dudit cap courant. 35 40

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**à l'étape B/c), pour engendrer un tronçon de trajectoire : 45

- c1) on engendre un arc de cercle (RF) en fonction de la vitesse à ladite extrémité aval, et on réalise un test de validation de cet arc de cercle; 50
- puis
- c2) on engendre un segment de droite (TF) associé à cet arc de cercle (RF), et on réalise un test de validation du tronçon de trajectoire formé de l'arc de cercle (RF) et du segment de droite (TF). 55

8. Procédé selon la revendication 7,

caractérisé en ce qu'à l'étape B/c1), on détermine un arc de cercle (RF) qui présente le rayon le plus petit susceptible d'être suivi par l'aéronef volant à une vitesse prédite.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**à l'étape B/c), un segment de droite (TF) est déterminé de manière similaire au segment de droite engendré à l'étape A/a).

10. Dispositif pour construire une trajectoire de vol optimale pour un aéronef, en particulier un avion de transport, ladite trajectoire de vol (TV) comprenant une trajectoire latérale et une trajectoire verticale et étant définie entre un point courant (PO) et un point cible (Pc),

caractérisé en ce qu'il comporte :

- au moins d'une base de données (3) relative à des obstacles (OB);
- des premiers moyens (4) permettant à un opérateur d'entrer un objectif indiquant au moins ledit point cible (Pc) ;
- des deuxièmes moyens (8) pour déterminer au moins un premier tronçon de trajectoire de vol à partir dudit point courant (PO), lesdits deuxièmes moyens (8) comprenant :

- un élément (15) pour engendrer au moins un segment de droite de longueur prédéterminée débutant audit point courant (PO);
- un élément (16) pour réaliser un test de validation de chaque segment de droite ainsi engendré, un test de validation utilisant ladite base de données relative à des obstacles et un profil vertical de référence ;
- un élément (17) pour évaluer chaque segment de droite engendré et validé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; et
- un élément (18) pour enregistrer, dans un moyen de stockage (19), chaque tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec sa note ;

- des troisièmes moyens (9) pour mettre en oeuvre un traitement itératif, lesdits troisièmes moyens (9) comprenant :

- un élément (21) pour prendre en compte, parmi toutes les trajectoires virtuelles enregistrées dans le moyen de stockage (19), la trajectoire virtuelle présentant le meilleure note par rapport à l'objectif fixé ;
- un élément (22) pour déterminer des changements de cap possibles à partir de l'extrémité aval de cette trajectoire virtuelle ;

- un élément (23) pour engendrer, pour chacun des changements de cap possibles, un tronçon de trajectoire débutant à ladite extrémité aval et comprenant au moins l'un des éléments suivants : un arc de cercle (RF) et un segment de droite (TF), pour lesquels un test de validation est réalisé ; 5
 - un élément (24) pour former, pour chaque tronçon de trajectoire engendré et validé, un nouveau tronçon de trajectoire de vol constitué de ladite trajectoire virtuelle suivie dudit tronçon de trajectoire ; 10
 - un élément (25) pour évaluer chaque nouveau tronçon de trajectoire ainsi formé, en lui attribuant une note qui est représentative de sa capacité à remplir l'objectif fixé ; 15
et
 - un élément (26) pour enregistrer, dans le moyen de stockage (19), chaque nouveau tronçon de trajectoire de vol qui illustre une trajectoire virtuelle, avec la note qui lui est attribuée ; 20
- lesdits troisièmes moyens (9) répétant la suite d'itérations précédentes jusqu'à ce que l'extrémité aval de la trajectoire virtuelle présentant la meilleure note à la fin d'une itération correspond audit point cible (Pc), cette trajectoire virtuelle représentant alors la trajectoire de vol optimale (TV) ; et 25
30
- des quatrièmes moyens (10, 11) pour transmettre cette trajectoire de vol optimale (TV) à des moyens utilisateurs (12).
11. Dispositif selon la revendication 10, 35
caractérisé en ce qu'il comporte, de plus, lesdits moyens utilisateurs (12) qui comprennent un écran de visualisation (13) de l'aéronef, pour afficher ladite trajectoire de vol optimale (TV). 40
12. Dispositif selon l'une des revendications 10 et 11, 45
caractérisé en ce que lesdits quatrièmes moyens comprennent des moyens pour transmettre ladite trajectoire de vol optimale (TV) à des moyens externes audit dispositif (1). 50
13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 10 à 12, **caractérisé en ce qu'**il comporte au moins une base de données relative à des obstacles fixes et au moins une base de données relative à des obstacles mobiles. 50
14. Aéronef, 55
caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif (1) tel que celui spécifié sous l'une quelconque des revendications 10 à 13.

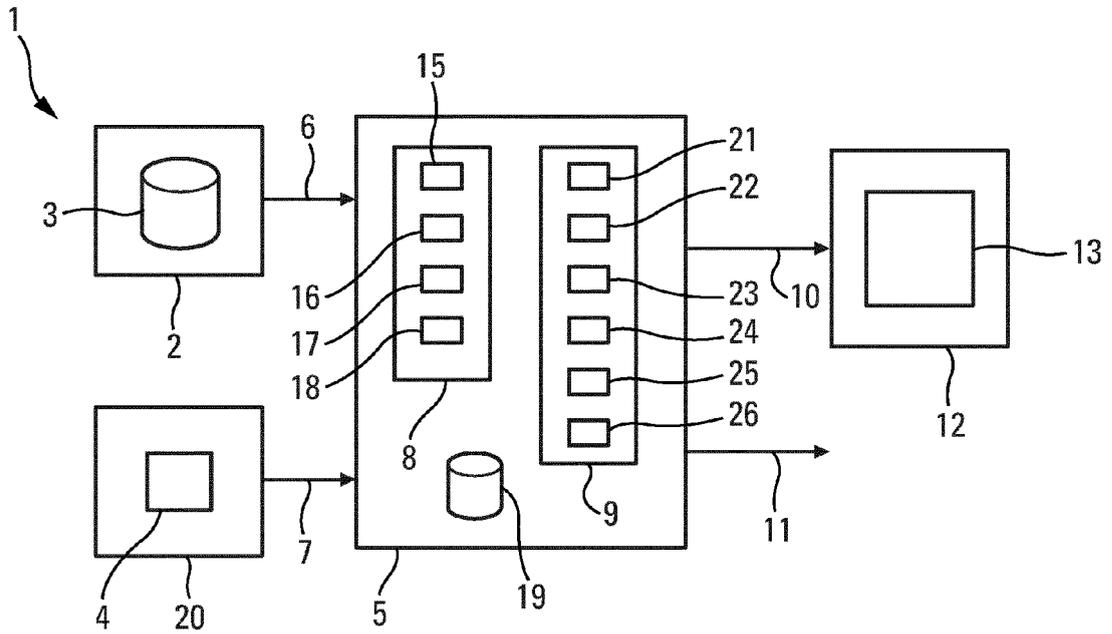


Fig. 1

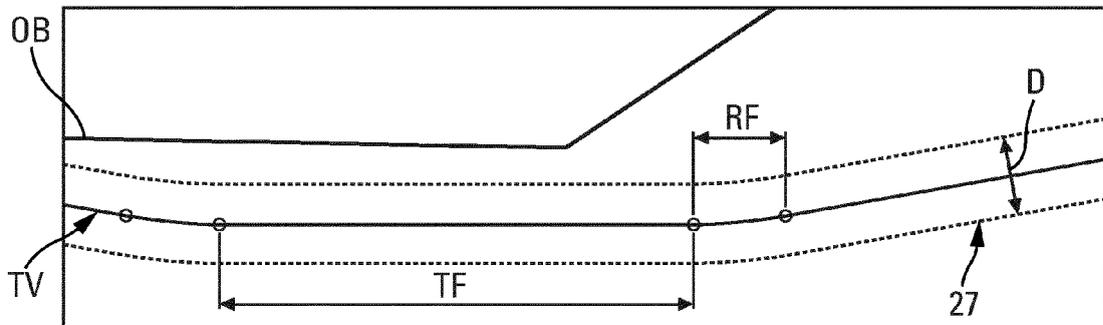


Fig. 2

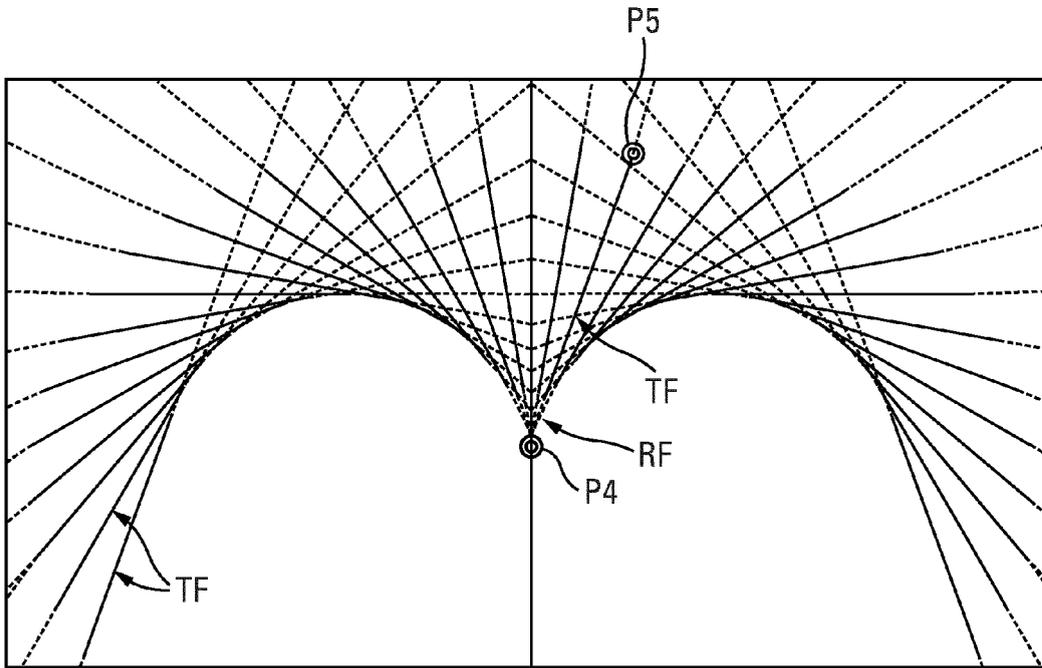


Fig. 3

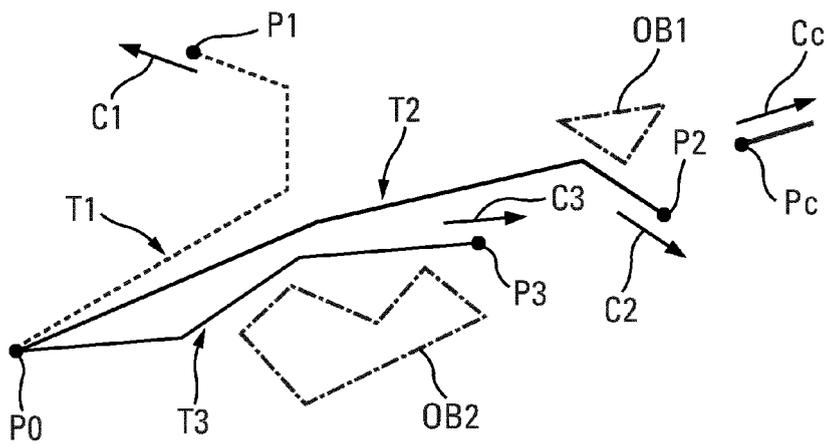


Fig. 4



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 11 19 1207

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	GB 2 440 249 A (EADS DEUTSCHLAND GMBH [DE]) 23 janvier 2008 (2008-01-23) * abrégé; figure 1 * * page 3, ligne 18 - page 2, ligne 5 * * page 2, ligne 33 - page 4, ligne 29 * -----	1,10,14	INV. G08G5/00
A	FR 2 607 948 A1 (DASSAULT ELECTRONIQUE [FR]) 10 juin 1988 (1988-06-10) * abrégé; figures 2,3 * * page 6, ligne 27 - ligne 34 * * page 9, ligne 5 - page 14, ligne 23 * -----	1,10,14	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G08G
1 Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 8 février 2012	Examineur Wagner, Ulrich
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03 82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 11 19 1207

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

08-02-2012

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
GB 2440249 A	23-01-2008	DE 102006033347 A1	31-01-2008
		FR 2918471 A1	09-01-2009
		GB 2440249 A	23-01-2008
		US 2008021635 A1	24-01-2008

FR 2607948 A1	10-06-1988	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82