(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
25 janvier 2024 (25.01.2024)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2024/018164 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G06V 10/143 (2022.01) *G06V 10/82* (2022.01)
G06V 10/50 (2022.01) *G06V 20/10* (2022.01)
G06V 10/75 (2022.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2023/051139

(22) Date de dépôt international :
21 juillet 2023 (21.07.2023)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2207482 21 juillet 2022 (21.07.2022) FR

(71) Déposants : **ARIANEGROUP SAS** [FR/FR] ; 51-61 Route de Verneuil, 78130 LES MUREAUX (FR). **CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (CNES)** [FR/FR] ; 2 PLACE MAURICE-QUENTIN, 75001 PARIS (FR).

(72) Inventeurs : **PYANET, Marine** ; c/o ARIANEGROUP Site des Mureaux, 66 route de Verneuil, 78130 Les Mureaux (FR). **JOFFRE, Théo** ; c/o ARIANEGROUP Site des Mureaux, 66 route de Verneuil, 78130 Les Mureaux (FR). **RICHARD, Pascal** ; c/o Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) - DOA/SME/SE, 18 avenue Edouard Belin, 31401 TOULOUSE CEDEX 9 (FR).

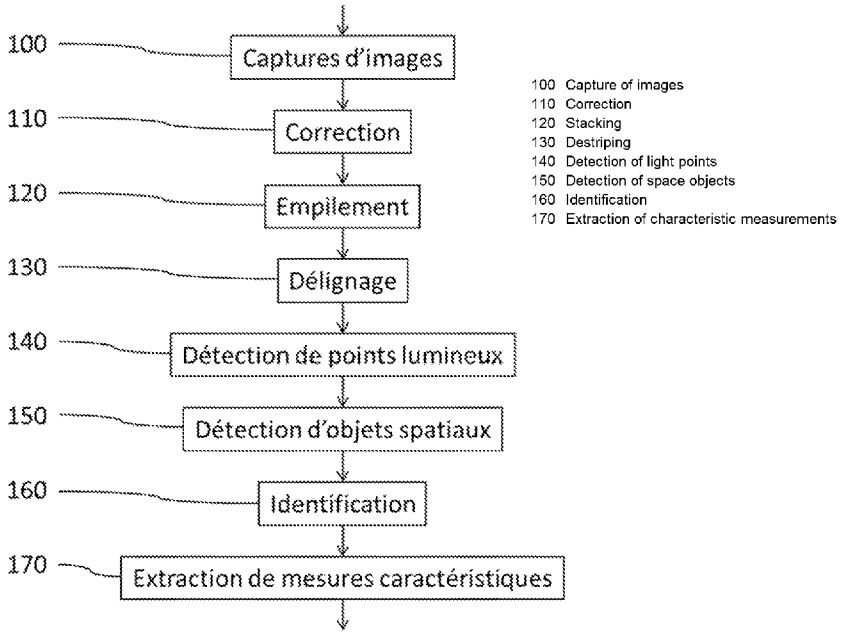
(74) Mandataire : **HEALY, Erwan** et al. ; CABINET BEAU DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université, 75340 PARIS CEDEX 07 (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR DAYTIME INFRARED SPACE SURVEILLANCE

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME DE SURVEILLANCE SPATIALE INFRAROUGE DE JOUR

[Fig. 1]



(57) **Abstract:** The invention relates to a space surveillance method for detecting space objects in orbit around the Earth in images captured during the daytime, the method comprising the following steps: - capturing (100) a plurality of infrared images of the daytime sky using an imaging device comprising at least one infrared sensor - detecting (140 and 150) space objects in orbit around the Earth on the basis of the images, the detection of light points being carried out by a deep-learning artificial intelligence system; - identifying (160) each detected object using a catalogue of space objects known to be in orbit around the Earth.

(57) **Abrégé :** Un procédé de surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre dans des images capturées pendant la journée, le procédé comprenant les étapes suivantes : - une capture (100) d'une pluralité d'images infrarouges du ciel de jour à l'aide d'un dispositif de prise de vue comportant au moins un capteur infrarouge, - une détection (140 et 150) d'objets spatiaux

WO 2024/018164 A1

[Suite sur la page suivante]

CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

en orbite autour de la Terre à partir des images, la détection de points lumineux étant mise en œuvre par un système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond - une identification (160) de chaque objet détecté à partir d'un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre.

Description

Titre de l'invention : Procédé et système de surveillance spatiale infrarouge de jour

Domaine Technique

L'invention concerne la surveillance d'objets en orbite autour de la Terre à l'aide de capteurs infrarouges à ondes courtes pendant la journée, et plus particulièrement un procédé de surveillance amélioré.

Un tel système permet de suivre l'évolution des trajectoires des objets, de cataloguer ces objets et de mettre à jour leurs trajectoires.

Technique antérieure

L'espace proche de la terre est défini comme la part de l'espace situé jusqu'à quelques centaines de milliers de kilomètres de la terre. La surveillance de l'espace proche de la terre concerne donc essentiellement, mais pas seulement, la détection des objets qui sont en orbite autour de la Terre.

Le contexte de la présente invention est la hausse du nombre d'objets en orbite autour de la Terre que l'on constate. Ces objets peuvent être, par exemple, des débris ou des satellites opérationnels.

Le nombre important d'objets spatiaux en orbite basse (LEO pour « Low Earth Orbit » en anglais), c'est-à-dire situé de 200km à 2000km de la surface terrestre, induit un risque croissant de collisions pouvant mener à long terme à un accroissement de la dégradation de la situation, mais surtout à des risques vis-à-vis des moyens spatiaux opérationnels, qu'ils soient militaires, scientifiques ou commerciaux. Or, chaque année, un nombre croissant de satellites sont lancés en orbite, rendant l'environnement spatial de plus en plus congestionné et contesté. Afin de maîtriser ces risques, il est primordial de cataloguer l'ensemble des objets potentiellement dangereux et de leur associer des paramètres orbitaux valides qui permettent de décrire leurs trajectoires.

Observés depuis un point fixe sur la Terre, les objets spatiaux en orbite basse présentent comme caractéristiques de défiler rapidement sur la voûte céleste. En outre, à chaque instant plusieurs objets traversent la sphère céleste en plusieurs endroits. Selon ses paramètres orbitaux chaque objet traverse la voûte céleste

locale à intervalles temporels plus ou moins réguliers, allant de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures.

Des effets divers tels que marée, freinage atmosphérique, pression de radiation, irrégularité du champ gravitationnel terrestre affectent les orbites. Ceci empêche de décrire ces orbites précisément à long terme avec un jeu invariant de paramètres orbitaux.

Par ailleurs, la distribution de taille des objets varie d'un rayon caractéristique de quelques millimètres, par exemple les résidus de propulsion, de peinture ou les météorites, à plusieurs dizaines de mètres, notamment les satellites ou systèmes orbitaux artificiels, qu'ils soient opérationnels ou non.

Réaliser une surveillance (ou « survey » en anglais) d'objets spatiaux en orbite basse implique de :
- détecter les objets spatiaux en orbite basse, sans connaissance a priori de leur existence, ni de leur position,
- définir leur trajectoire ou paramètres orbitaux, avec une précision adaptée à l'exploitation envisagée,
- mettre à jour, au cours du temps, les paramètres orbitaux des objets détectés.

Il est en outre nécessaire de réacquérir les mêmes objets et de rafraîchir la mesure de leurs paramètres orbitaux régulièrement afin que leur précision reste adaptée en fonction de l'exploitation qui doit en être faite, par exemple pour mettre en œuvre les processus d'évaluation de risques de collision.

Enfin, le système doit être capable d'affiner sur demande la précision de la connaissance des paramètres orbitaux d'un objet donné, de sorte de pouvoir prédire précisément sa position dans un avenir proche, typiquement quelques jours, en vue par exemple de consolider un risque de collision et de planifier d'éventuelles manœuvres d'évitement.

Pour surveiller les objets spatiaux en orbite autour de la Terre, on utilise généralement des télescopes ou des radars.

Bien qu'ils soient moins chers et plus faciles à utiliser que les radars, les télescopes au sol sont généralement incapables de voir les satellites à haute altitude pendant la journée à cause du fond de ciel lumineux.

Les satellites peuvent également être difficiles à suivre par les radars compte tenu de leur distribution géographique limitée et de leurs limites de portée.

En conséquence, il y a des périodes de temps non observées chaque jour pendant lesquelles des objets spatiaux potentiellement dangereux et/ou néfastes peuvent manœuvrer sans être détectés depuis le sol, ce qui pourrait entraîner la perte de la garde des opérateurs de satellites et mettre potentiellement en danger les satellites à proximité.

Les télescopes optiques au sol sont contraints de fonctionner pendant la nuit en raison de l'augmentation du bruit d'émission de photons, ou bruit quantique, et du potentiel de saturation du fond de ciel diurne. Bien que certains systèmes au sol aient résolu ces problèmes, ces systèmes sont généralement coûteux. Des satellites de surveillance spatiale peuvent également être utilisés pendant la journée et ne rencontrent pas de problèmes de détection de bruit d'émission de photons, mais sont également coûteux et ont des limites en raison de leurs schémas d'observation, de leur besoin de faire face à l'évitement solaire et de leur latence relativement longue dans l'envoi des données de suivi au sol. Les systèmes de radiofréquences (RF) passifs basés au sol peuvent détecter des objets spatiaux résidents (RSO) pendant la journée, mais ces RSO doivent transmettre activement des données à une station satellite au sol. En conséquence, la plupart des RSO ne sont pas observés pendant la journée, laissant les RSO à proximité vulnérables aux activités dangereuses et/ou néfastes.

L'observatoire de Graz en Autriche réalise de la détection laser en pleine journée sur certains objets spatiaux. Mais, l'observation de ces objets se basant sur des capteurs dans le visible, elle est limitée à des objets très lumineux et en orbite basse.

Comme cela est indiqué dans l'article « Daytime GEO Tracking with Aquila : Approach and Results from a New Ground-Based SWIR Small Telescope System » de Numerica Corporation, il est connu d'utiliser des ondes infrarouges à courtes longueurs d'ondes pour la surveillance d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre. La plupart des techniques utilisant de telles ondes utilisent de très grand télescopes (supérieurs à 1m de diamètre) et/ou des systèmes optiques à refroidissement

cryogénique et n'ont généralement pas pu démontrer une capacité à observer des objets sur une orbite plus éloigné que l'orbite basse de la Terre en pleine journée.

Il est également connu des documents US 10740609 et US 9423341 des systèmes de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre en plein jour à l'aide de capteurs infrarouges.

Même si ces systèmes présentent des avantages par rapport aux précédents systèmes connus, les systèmes décrits dans ces documents restent complexes et onéreux. Les procédés mis en œuvre impliquent notamment d'utiliser des télescopes spécifiquement calibrés et optimisés pour un fonctionnement dans l'infrarouge (plus onéreux). Les procédés utilisent également des procédés complexes de calibration pour traiter le bruit notamment, les procédés utilisant des développements spécifiques.

Exposé de l'invention

La présente invention a donc pour but principal de fournir un système et un procédé de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre capable de fonctionner en plein jour et moins onéreux que les systèmes connus.

Selon un objet de l'invention, il est proposé un procédé de surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre dans des images capturées pendant la journée, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- une capture d'une pluralité de prises de vue dans l'infrarouge du ciel de jour à l'aide d'un dispositif de prise de vue comportant au moins un capteur infrarouge, chaque prise de vue dans l'infrarouge comportant une matrice de pixels qui sont associés chacun à une intensité de lumière reçue par un capteur infrarouge,
- une détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre à partir des prises de vue capturées,
- une identification de chaque objet détecté à partir d'un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre.

Selon une caractéristique générale de l'invention, l'étape de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre est mise en œuvre par un système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes, l'étape de détection d'objets

spatiaux en orbite autour de la Terre comportant :

- une détection de points lumineux sur chaque prise de vue,
- une discrimination des points lumineux détectés, la discrimination comportant un suivi de chaque point lumineux détecté et stationnaire dans des prises de vue successives, et, un enregistrement des coordonnées des points lumineux détectés à des positions éventuellement différentes et regroupés par ce suivi, l'enregistrement étant réalisé, pour chaque point lumineux détecté, à la suite de sa disparition dans les prises de vue suivantes.

Ledit capteur infrarouge, tel qu'une caméra SWIR (« short wave infrared » en anglais), fournit des images qui peuvent être très différentes des images visibles en termes de caractéristiques de bruit, d'hétérogénéités, de défauts notamment. C'est pourquoi les algorithmes de détection classiques directement transposés de l'application d'imagerie visible donnent de mauvais résultats.

Afin d'obtenir de meilleurs résultats de détection, y compris sur des objets à faible rapport signal sur bruit (SNR), le procédé selon l'invention comprend un algorithme basé sur l'intelligence artificielle. Il est basé sur un réseau de neurones entraîné sur un ensemble d'images spécifiquement simulées pour être le plus représentatif possible des images infrarouges réelles dans la configuration optique utilisée pour l'acquisition des images. Un ensemble d'images réelles acquises en conditions réelles avec le dispositif expérimental a été étudié pour construire un modèle réaliste de bruit, de défauts, de réponse, de fond et de non-uniformités. Ensuite, ces modèles ont été utilisés pour simuler un ensemble d'images, avec une vérité terrain connue, à utiliser comme ensemble d'entraînement pour le réseau de neurones.

En utilisant une intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond, ou « deep learning » en anglais, pour le traitement des images infrarouges, le procédé selon l'invention présente l'avantage de pouvoir fonctionner à partir d'une calibration simple réalisée à partir d'une vue du ciel qui ne nécessite pas de module ou de développement spécifique.

Le « Deep learning », ou apprentissage profond, est l'une des technologies principales du Machine learning, mettant en œuvre des algorithmes capables de mimer les actions du cerveau humain grâce à des réseaux de neurones artificielles composés de dizaines voire de centaines de « couches » de neurones, chacune recevant et

interprétant les informations de la couche précédente. Les réseaux de « deep learning » sont entraînés sur la base de structures complexes de données auxquelles ils sont confrontés.

Le procédé selon l'invention présente également l'avantage de pouvoir être utilisé par un système doté d'un télescope à réflexion classique qui n'a pas été optimisé pour un fonctionnement avec des ondes infrarouges à courtes longueurs d'ondes. Le dispositif de prise de vues permet ainsi de facilement réaliser, depuis la Terre, une surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre dans des images capturées pendant la journée.

Dans un premier mode de réalisation du procédé de surveillance selon l'invention, les couches de réseaux de neurones artificiels peuvent être calibrées, préalablement à leur utilisation pour détecter des objets spatiaux (satellites, débris, étoiles etc…) présents dans les images infrarouges, par un procédé d'apprentissage supervisé à partir d'une base de différentes images permettant au système d'intelligence artificielle de déterminer les caractéristiques typiques d'un objet spatial (caractéristiques différenciant un point lumineux correspondant à un objet spatial réel du fond de l'image, des pixels chauds, du bruit électronique, etc…).

Dans un deuxième mode de réalisation du procédé de surveillance selon l'invention, le procédé peut comprendre, en outre, juste après la capture de prises de vue, une application d'une correction de non-uniformité sur les prises de vue capturées.

Dans un troisième mode de réalisation du procédé de surveillance selon l'invention, le procédé peut comprendre, en outre un filtrage de chaque image empilée obtenue.

Dans un quatrième mode de réalisation du procédé de surveillance selon l'invention, le procédé peut comporter en outre une formation d'images empilées à partir d'une superposition d'une pluralité desdites prises de vue, chaque pixel d'une image empilée étant associé à une intensité de lumière reçue correspondant à la moyenne des intensités des prises de vue superposées pour le même pixel, la détection d'objets spatiaux utilisant les images empilées comme prises de vue à traiter.

Dans un cinquième mode de réalisation du procédé de surveillance selon l'invention, le procédé peut comprendre, en outre, avant l'étape de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre, une étape de délignage de chaque image empilée pour éliminer les défauts en stries sur l'image empilée.

Selon un autre objet de l'invention, il est proposé un système de surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre, le système comprenant un télescope réflecteur monté sur un support mécanique à déplacement motorisé, un dispositif de prises de vue comportant au moins un capteur infrarouge monté en sortie du télescope réflecteur et configuré pour prendre des séries de prises de vue du ciel de jour à une fréquence comprise entre 1 Hz et quelques centaines de Hertz, et une unité de traitement recevant chaque prise de vue capturée par le dispositif de prises de vue.

Selon une caractéristique générale du système de surveillance spatiale selon l'invention, l'unité de traitement peut comprendre un système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes, l'unité de traitement étant configurée pour réaliser les étapes suivantes à partir des prises de vues reçues :

- une détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre à partir des prises de vue capturées, la détection étant réalisée par le système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond, et
- une identification de chaque objet détecté à partir d'un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre,

la détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre comportant une détection de points lumineux sur chaque prise de vue, et une discrimination des points lumineux détectés, la discrimination comportant un suivi de chaque point lumineux détecté et stationnaire dans des prises de vue successives, et, un enregistrement des coordonnées des points lumineux détectés à des positions éventuellement différentes et regroupés par ce suivi, l'enregistrement étant réalisé, pour chaque point lumineux détecté, à la suite de sa disparition dans les prises de vue suivantes.

Dans un mode de réalisation du système de surveillance spatiale, le dispositif de prises de vue peut comprendre en outre au moins un capteur de lumière visible monté en sortie du télescope réflecteur et configuré pour prendre des séries de prises de vue du ciel de nuit, le système de surveillance spatiale comprenant en outre un module d'alternance jour/nuit permettant de changer le type de capteur recevant la lumière du ciel en fonction de l'intensité lumineuse environnementale

Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention ressortiront de la description faite ci-dessous, en référence aux dessins annexés qui en illustrent un exemple de réalisation dépourvu de tout caractère limitatif.

[Fig. 1] La figure 1 représente un procédé de surveillance spatiale selon un mode de mise en œuvre de l'invention.

[Fig. 2] La figure 2 représente un système de surveillance spatiale selon un premier mode de réalisation de l'invention.

[Fig. 3] La figure 3 représente un système de surveillance spatiale selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

Description des modes de réalisation

Sur la figure 2 est représenté schématiquement un système de surveillance spatiale selon un premier mode de réalisation de l'invention.

Le système 1 de surveillance spatiale est configuré pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre. Le système 1 comprend un télescope réflecteur 2 monté sur un support 3 mécanique à déplacement motorisé, un dispositif 4 de prises de vue monté en sortie du télescope réflecteur 2 et comportant au moins un capteur infrarouge 40, et une unité de traitement 5 recevant chaque prise de vue capturée par le dispositif 4 de prises de vue.

Le dispositif 4 de prises de vue est configuré pour prendre des séries de prises de vue du ciel de jour à une fréquence comprise entre 1 Hz et quelques centaines de Hertz. Le temps de pose pour chaque prise de vue est réglé pour limiter la saturation du capteur infrarouge 40.

L''unité de traitement 5 comprend un système d'intelligence artificielle 50 fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes. L'unité de traitement 50 est configurée pour mettre en œuvre un procédé de surveillance spatiale dans des images capturées pendant la journée.

Sur la figure 1 est représenté un tel procédé de surveillance selon un mode de mise en œuvre de l'invention.

Dans une première étape 100 du procédé, on réalise une capture d'une pluralité d'images infrarouges du ciel en pleine journée à l'aide du dispositif 4 de prise de vue et de son capteur infrarouge 40. Chaque image infrarouge comporte une matrice de pixels qui sont associés chacun à une intensité de lumière reçue par le capteur infrarouge.

Dans une deuxième étape 110 du procédé, on réalise une correction de la non-uniformité de réponse des pixels pour chaque image capturée. Cette correction est faite via l'acquisition préalable d'une image uniforme de référence, acquise directement sur ciel dans une zone dépourvue d'objets lumineux (étoiles ou satellites). Cette calibration ne nécessite pas de démontage du capteur, ni de matériel complémentaire.

Dans une étape suivante 120 du procédé, on réalise des empilements d'une pluralité d'images capturées successivement. L'image empilée obtenue est réalisée par la superposition des images infrarouges de l'empilement. Chaque pixel d'une image empilée est associé à une intensité de lumière reçue correspondant à la moyenne des intensités des images infrarouges superposées pour le même pixel.

Dans une étape suivante 130, on réalise ensuite un délignage, ou « destriping » en anglais, pour chaque image empilée. Le délignage permet d'éliminer les défauts en stries qui peuvent apparaître sur l'image empilée à cause de la superposition des images infrarouges.

Dans une étape suivante 140, on réalise une détection des points lumineux, ou « plot detection » en anglais », sur chacune des images empilées délignées. Cette étape consiste en une extraction des points lumineux par rapport au bruit de fond.

Cette étape de détection des points lumineux 140 peut être précédée d'un filtrage d'image classique (type moyenneur) pour réduire le bruit de fond et améliorer les performances de la détection.

L'étape 140 de détection des points lumineux est mise en œuvre par le système d'intelligence artificielle 50 fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes.

Dans une étape suivante 150, on réalise une discrimination des points lumineux détectés à l'étape précédente 140 en étoiles ou satellites. Cette discrimination comporte un suivi des points lumineux détectés et stationnaires dans les images (ces points stationnaires appartiennent donc au même objet spatial). Et dès lors que tous les points d'un même objet spatial sont listés, on réalise un enregistrement des coordonnées des points lumineux détectés à des positions éventuellement différentes et regroupés par ce pistage. Autrement dit, l'enregistrement est réalisé dès lors que point lumineux détecté disparaît sur les images suivantes.

La détection d'objets spatiaux à l'étape 150 permet ainsi d'obtenir les objets spatiaux en orbite autour de la Terre présents dans les images.

Dans une étape suivante 160, les objets détectés sont comparés aux objets répertoriés dans un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre. Le catalogue répertorie les objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre en y indiquant les différentes caractéristiques de l'objet spatial : ses dimensions, son orbite, et différentes caractéristiques intrinsèques.

Dans une étape suivante 170, de nouvelles caractéristiques sont extraites à partir des objets détectés dans les images empilées, pour soit mettre à jour les informations relatives à cet objet spatial s'il est déjà répertorié dans le catalogue, ou pour ajouter un nouvel objet spatial dans le catalogue.

Les couches de réseaux de neurones artificiels sont calibrées, préalablement à leur utilisation pour détecter des objets spatiaux (étoiles, satellites, débris, etc…), par un procédé d'apprentissage supervisé à partir d'une base de différentes images permettant au système d'intelligence artificielle de déterminer les caractéristiques typiques d'un objet spatial (étoiles, satellites, débris, etc…). La calibration est effectuée sur un jeu d'images de simulation qui ont été générées pour reproduire des images typiques issues du capteur. Chaque image de simulation comprend un fond et du bruit de fond, des plots lumineux correspondant soit à des étoiles, soit à des objets spatiaux, soit à des défauts du capteur. A chaque image ainsi créée, on associe sa vérité, soit les positions des objets réels dans l'image (étoiles et satellites). Un grand nombre d'images est ainsi créé et sert de base d'apprentissage au réseau de neurones.

La présente invention permet ainsi de fournir un système et un procédé de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre capable de fonctionner en plein jour et moins onéreux que les systèmes connus.

Revendications

[Revendication 1] Procédé de surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre dans des images capturées pendant la journée, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- une capture (100) d'une pluralité de prises de vue dans l'infrarouge du ciel de jour à l'aide d'un dispositif de prise de vue comportant au moins un capteur infrarouge, chaque prise de vue dans l'infrarouge comportant une matrice de pixels qui sont associés chacun à une intensité de lumière reçue par un capteur infrarouge,
- une détection (140 et 150) d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre à partir desdites prises de vue,
- une identification (160) de chaque objet détecté à partir d'un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre,
- le procédé étant caractérisé en ce que l'étape de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre est mise en œuvre par un système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes, l'apprentissage profond étant basé sur des images de simulation générées pour reproduire des images typiques issues du capteur infrarouge et comportant un fond et du bruit de fond, des plots lumineux correspondant soit à des étoiles, soit à des objets spatiaux, soit à des défauts du capteur infrarouge, chaque image de simulation étant associée à une vérité basée sur les positions des objets réels dans l'image,

et l'étape de détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre comportant :

- une détection (140) de points lumineux sur chaque prise de vue,
- une discrimination (150) des points lumineux détectés, la discrimination comportant un suivi de chaque point lumineux détecté et stationnaire dans des prises de vue successives, et, un enregistrement des coordonnées des points lumineux détectés à des positions éventuellement différentes et

regroupés par ce suivi, l'enregistrement étant réalisé, pour chaque point lumineux détecté, à la suite de sa disparition dans les prises de vue suivantes.

[Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel les couches de réseaux de neurones artificiels sont calibrées, préalablement à leur utilisation pour détecter des objets spatiaux, par un procédé d'apprentissage supervisé à partir d'une base de différentes images permettant au système d'intelligence artificielle de déterminer les caractéristiques typiques d'un objet spatial.

[Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, comprenant en outre, juste après la capture (100) de prises de vue, une application (110) d'une correction de non-uniformité sur les prises de vue capturées.

[Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, comprenant en outre un filtrage de chaque prise de vue.

[Revendication 5] Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, comportant en outre une formation (120) d'images empilées à partir d'une superposition d'une pluralité desdites prises de vue, chaque pixel d'une image empilée étant associé à une intensité de lumière reçue correspondant à la moyenne des intensités des prises de vue superposées pour le même pixel, la détection (140 et 150) d'objets spatiaux utilisant les images empilées comme prises de vue à traiter.

[Revendication 6] Procédé selon la revendication 5, comprenant en outre, avant l'étape de détection des points lumineux, une étape de délignage (130) de chaque image empilée pour éliminer les défauts en stries sur l'image empilée.

[Revendication 7] Système (1, 10) de surveillance spatiale pour détecter des objets spatiaux en orbite autour de la Terre, le système (1) comprenant un télescope réflecteur (2) monté sur un support (3) mécanique à déplacement motorisé, un dispositif (4, 4') de prises de vue comportant au moins un capteur infrarouge (40) monté en sortie du télescope réflecteur (2) et configuré pour prendre des séries de prises de vue du ciel de jour à une fréquence comprise entre 1 Hz et quelques centaines de Hertz, et une unité de traitement (5)

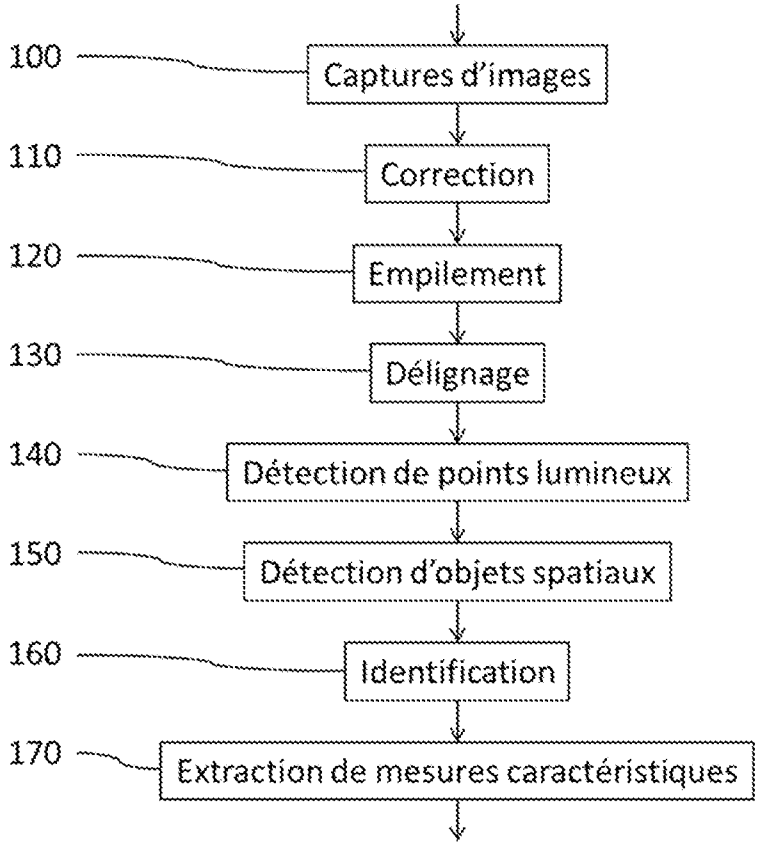
recevant chaque prise de vue capturée par le dispositif de prises de vue, caractérisé en ce que l'unité de traitement comprend un système d'intelligence artificielle (50) fonctionnant par apprentissage profond et comportant une pluralité de couches de réseau de neurones artificiels reliées entre elles pour analyser les informations de la couche de neurones précédentes, l'unité de traitement étant configurée pour réaliser les étapes suivantes à partir des prises de vues reçues :

- une détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre à partir des prises de vue capturées, la détection de points lumineux étant réalisée par le système d'intelligence artificielle fonctionnant par apprentissage profond, et
- une identification de chaque objet détecté à partir d'un catalogue d'objets spatiaux connus en orbite autour de la Terre,

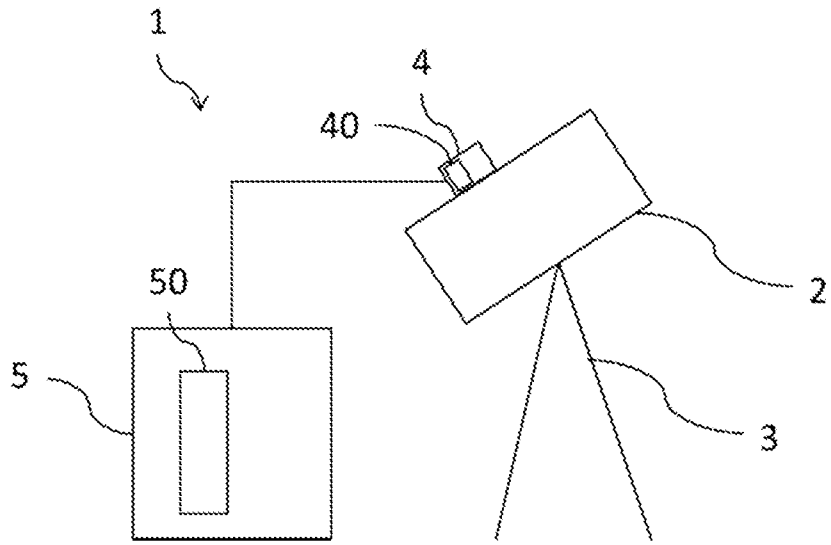
la détection d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre comportant une détection (140) de points lumineux sur chaque prise de vue, et une discrimination (150) des points lumineux détectés, la discrimination comportant un suivi de chaque point lumineux détecté et stationnaire dans des prises de vue successives, et, un enregistrement des coordonnées des points lumineux détectés à des positions éventuellement différentes et regroupés par ce suivi, l'enregistrement étant réalisé, pour chaque point lumineux détecté, à la suite de sa disparition dans les prises de vue suivantes.

[Revendication 8] Système (10) de surveillance spatiale selon la revendication 7, dans lequel le dispositif (4') de prises de vue comprend en outre au moins un capteur de lumière visible (42) monté en sortie du télescope réflecteur (2) et configuré pour prendre des séries de prises de vue du ciel de nuit, le système (10) de surveillance spatiale comprenant en outre un module d'alternance jour/nuit (44) permettant de changer le type de capteur recevant la lumière du ciel en fonction de l'intensité lumineuse environnementale.

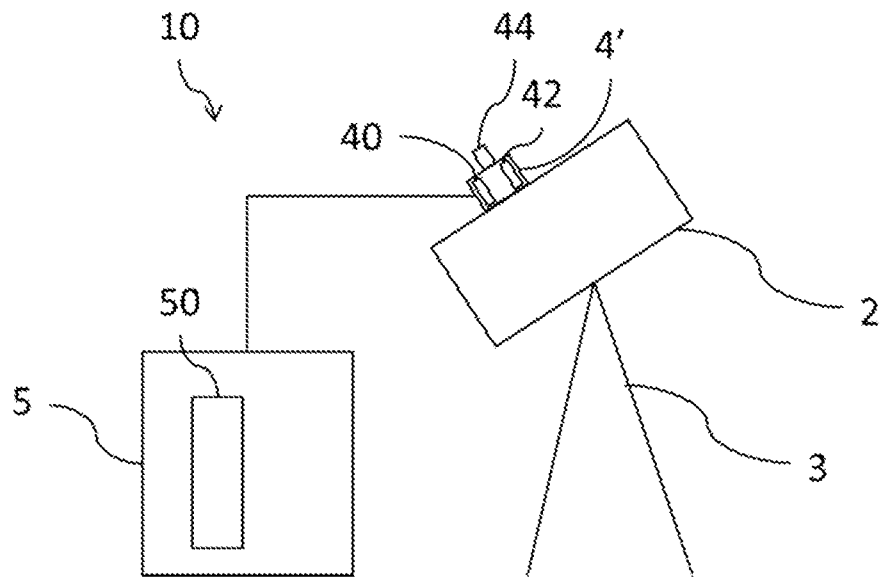
[Fig. 1]


100
Captures d'images
110
Correction
120
Empilement
130
Délignage
140
Détection de points lumineux
150
Détection d'objets spatiaux
160
Identification
170
Extraction de mesures caractéristiques

[Fig. 2]


1
4
40
2
50
5
3

[Fig. 3]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/FR2023/051139

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06V 10/143(2022.01)i; ***G06V 10/50***(2022.01)i; ***G06V 10/75***(2022.01)i; ***G06V 10/82***(2022.01)i; ***G06V 20/10***(2022.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2021064849 A1 (SHADDIX JEFFREY HALE [US] ET AL) 04 March 2021 (2021-03-04) figures 1-4,8-10 paragraph [0002] - paragraph [0006] paragraph [0019] - paragraph [0064] paragraph [0083] - paragraph [0092]	1-8
Y	US 9423341 B1 (JIM KEVIN T C [US] ET AL) 23 August 2016 (2016-08-23) column 1, line 14 - column 7, line 3	1-8
Y	RODRIGUEZ-VILLAMIZAR JULIAN ET AL. "Daylight Measurement Acquisition of Defunct Resident Space Objects Combining Active and Passive Electro-Optical Systems" *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE, USA,* Vol. 60, 01 June 2022 (2022-06-01), pages 1-17, [retrieved on 2022-06-02] DOI: 10.1109/TGRS.2022.3179719 ISSN: 0196-2892, XP011911495 sections I-IV;page 1 - page 14	1-8

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 September 2023	**21 September 2023**
Name and mailing address of the ISA/EP **European Patent Office** **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	Authorized officer **Chehade, Thomas** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/FR2023/051139

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Shaddix Jeff ET AL. "Daytime Optical Contributions Toward Timely Space Domain Awareness in Low Earth Orbit" 01 January 2021 (2021-01-01), Retrieved from the Internet: https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/SSA-SDA/Shaddix.pdf [retrieved on 2023-03-10] XP093030794 sections 1-3;page 1 - page 8	1-8
Y	FITZGERALD GARRETT ET AL. "Geosynchronous satellite detection and tracking with WFOV camera arrays using spatiotemporal neural networks (GEO-SPANN)" *SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING, 2005, SAN DIEGO, CALIFORNIA, UNITED STATES, SPIE, US,* Vol. 12101, 27 May 2022 (2022-05-27), pages 1210104-1210104 DOI: 10.1117/12.2618047 ISSN: 0277-786X, ISBN: 978-1-5106-4548-6. XP060160796 sections 1-4;page 1 - page 10	1-8
Y	DENG QIUQUN ET AL. "Multi-Scale Convolutional Neural Networks for Space Infrared Point Objects Discrimination" *IEEE ACCESS,* Vol. 7, 18 March 2019 (2019-03-18), pages 28113-28123 DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2898028 XP011715159 sections I-III;page 28113 - page 28118	1-8
Y	PENG JIA ET AL. "Detection and Classification of Astronomical Targets with Deep Neural Networks in Wide Field Small Aperture Telescopes" *ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853,* 21 February 2020 (2020-02-21), XP081621274 sections 1-3;page 1 - page 8	1-8
Y	TAO JIANG ET AL. "Deep Convolutional Neural Network Based Small Space Debris Saliency Detection" *2019 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION AND COMPUTING (ICAC), CHINESE AUTOMATION AND COMPUTING SOCIETY IN THE UK - CACSUK,* 05 September 2019 (2019-09-05), pages 1-6 DOI: 10.23919/ICONAC.2019.8895100 XP033649490 sections I-II;page 1 - page 3	1-8
Y	SALVATORE NIKOLAUS ET AL. "Learned Event-based Visual Perception for Improved Space Object Detection" *2022 IEEE/CVF WINTER CONFERENCE ON APPLICATIONS OF COMPUTER VISION (WACV), IEEE,* 03 January 2022 (2022-01-03), pages 3301-3310 DOI: 10.1109/WACV51458.2022.00336 XP034086528 sections 1-4;page 3301 - page 3307	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/FR2023/051139

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2021064849 A1	04 March 2021	AU 2020336198 A1	17 March 2022
		CA 3148843 A1	04 March 2021
		EP 4022566 A1	06 July 2022
		US 10740609 B1	11 August 2020
		US 2021064849 A1	04 March 2021
		US 2023154179 A1	18 May 2023
		WO 2021041918 A1	04 March 2021
US 9423341 B1	23 August 2016	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/FR2023/051139

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. G06V10/143 G06V10/50 G06V10/75 G06V10/82 G06V20/10
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
G06V

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 2021/064849 A1 (SHADDIX JEFFREY HALE [US] ET AL) 4 mars 2021 (2021-03-04) figures 1-4,8-10 alinéa [0002] - alinéa [0006] alinéa [0019] - alinéa [0064] alinéa [0083] - alinéa [0092] -----	1-8
Y	US 9 423 341 B1 (JIM KEVIN T C [US] ET AL) 23 août 2016 (2016-08-23) colonne 1, ligne 14 - colonne 7, ligne 3 -----	1-8

-/--

[x] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[x] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée
"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
"X" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
"Y" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
13 septembre 2023	21/09/2023

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Chehade, Thomas

1

Formulaire PCT/ISA/210 (deuxième feuille) (avril 2005)

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	RODRIGUEZ-VILLAMIZAR JULIAN ET AL: "Daylight Measurement Acquisition of Defunct Resident Space Objects Combining Active and Passive Electro-Optical Systems", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE, USA, vol. 60, 1 juin 2022 (2022-06-01), pages 1-17, XP011911495, ISSN: 0196-2892, DOI: 10.1109/TGRS.2022.3179719 [extrait le 2022-06-02] sections I-IV; page 1 - page 14	1-8
Y	Shaddix Jeff ET AL: "Daytime Optical Contributions Toward Timely Space Domain Awareness in Low Earth Orbit", , 1 janvier 2021 (2021-01-01), XP093030794, Extrait de l'Internet: URL:https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/SSA-SDA/Shaddix.pdf [extrait le 2023-03-10] sections 1-3; page 1 - page 8	1-8
Y	FITZGERALD GARRETT ET AL: "Geosynchronous satellite detection and tracking with WFOV camera arrays using spatiotemporal neural networks (GEO-SPANN)", SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING, 2005, SAN DIEGO, CALIFORNIA, UNITED STATES, SPIE, US, vol. 12101, 27 mai 2022 (2022-05-27), pages 1210104-1210104, XP060160796, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.2618047 ISBN: 978-1-5106-4548-6 sections 1-4; page 1 - page 10	1-8
Y	DENG QIUQUN ET AL: "Multi-Scale Convolutional Neural Networks for Space Infrared Point Objects Discrimination", IEEE ACCESS, vol. 7, 18 mars 2019 (2019-03-18), pages 28113-28123, XP011715159, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2898028 sections I-III; page 28113 - page 28118	1-8

-/--

1

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	PENG JIA ET AL: "Detection and Classification of Astronomical Targets with Deep Neural Networks in Wide Field Small Aperture Telescopes", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 21 février 2020 (2020-02-21), XP081621274, sections 1-3; page 1 - page 8	1-8
Y	TAO JIANG ET AL: "Deep Convolutional Neural Network Based Small Space Debris Saliency Detection", 2019 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION AND COMPUTING (ICAC), CHINESE AUTOMATION AND COMPUTING SOCIETY IN THE UK - CACSUK, 5 septembre 2019 (2019-09-05), pages 1-6, XP033649490, DOI: 10.23919/ICONAC.2019.8895100 sections I-II; page 1 - page 3	1-8
Y	SALVATORE NIKOLAUS ET AL: "Learned Event-based Visual Perception for Improved Space Object Detection", 2022 IEEE/CVF WINTER CONFERENCE ON APPLICATIONS OF COMPUTER VISION (WACV), IEEE, 3 janvier 2022 (2022-01-03), pages 3301-3310, XP034086528, DOI: 10.1109/WACV51458.2022.00336 sections 1-4; page 3301 - page 3307	1-8

1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2023/051139

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2021064849 A1	04-03-2021	AU 2020336198 A1	17-03-2022
		CA 3148843 A1	04-03-2021
		EP 4022566 A1	06-07-2022
		US 10740609 B1	11-08-2020
		US 2021064849 A1	04-03-2021
		US 2023154179 A1	18-05-2023
		WO 2021041918 A1	04-03-2021
US 9423341 B1	23-08-2016	AUCUN	