

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 140 261**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **22 09895**

⑤1 Int Cl⁸ : **A 61 F 2/70 (2022.01), A 61 F 2/68**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Procédé de commande d'une prothèse bionique de membre inférieur.

②2 Date de dépôt : 29.09.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 05.04.24 Bulletin 24/14.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 18.10.24 Bulletin 24/42.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *HOLON SARL — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : *MILLER Luca.*

⑦3 Titulaire(s) : *HOLON SARL.*

⑦4 Mandataire(s) : *ARGYMA.*

FR 3 140 261 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de commande d'une prothèse bionique de membre inférieur

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne le domaine des prothèses bioniques destinées à des personnes amputées d'un membre.
- [0002] En particulier, la présente invention propose un procédé de commande d'une telle prothèse bionique.

ETAT DE LA TECHNIQUE

- [0003] Comme cela est connu, une prothèse permet de remplacer un membre ou une partie d'un membre d'un point de vue à la fois fonctionnel et esthétique. Dans le contexte d'une personne amputée du membre inférieur, il est souhaitable d'avoir une prothèse rendant la marche la plus naturelle possible et permettant à l'utilisateur de conserver son équilibre, notamment par exemple lors de la montée et de la descente d'un escalier, ou lors d'une marche arrière.
- [0004] En particulier, une prothèse bionique se distingue en ce qu'elle met en œuvre un procédé robotique qui, à partir de commandes, correspondant aux intentions de la personne amputée, engendrent un mouvement de la prothèse. Différentes catégories de prothèses bioniques sont documentées dans l'état de la technique, les plus répandues étant les prothèses myoélectriques, les prothèses hydrauliques, les prothèses neuro-électriques, et les prothèses électroniques.
- [0005] Comme cela est connu, les prothèses myoélectriques reposent sur l'activation musculaire. Des capteurs, notamment positionnés au niveau du moignon, détectent les contractions musculaires et envoient des signaux électriques afin de commander la prothèse. La prise en main par la personne amputée de cette prothèse nécessite de réaliser un grand travail de rééducation afin d'apprendre à contrôler les contractions musculaires de façon adaptée. Ainsi, l'utilisation d'une prothèse myoélectrique nécessite une parfaite maîtrise de la personne amputée pour pouvoir enclencher les mouvements avec une précision et une force adéquates. De plus, les mouvements possibles sont généralement limités.
- [0006] Par le passé, le demandeur a mis au point une prothèse bionique présentant une autonomie et une précision améliorées, notamment une prothèse bionique percevant l'environnement de façon autonome, permettant de réduire la difficulté et la durée de l'apprentissage de son fonctionnement par un utilisateur, ainsi que la charge mentale que ce type de prothèse implique pour ce dernier.
- [0007] Dans le cas d'une prothèse bionique pour membre inférieur, l'utilisateur dispose ainsi

d'une mise en mouvement plus instinctive et la perception améliorée de l'environnement par la prothèse bionique permet une meilleure adaptation de son positionnement par rapport au terrain.

[0008] Néanmoins, l'utilisation d'une telle prothèse reste perfectible. D'une part, la gestion des mouvements lors des phases de transition entre des terrains aux dénivelés ou aux états de surfaces différents peut être améliorée et d'autre part, le comportement dynamique de la prothèse bionique tient peu compte des différences morphologiques d'un utilisateur à un autre, par exemple le poids, la taille ou l'âge. Le comportement dynamique de la prothèse ne tient pas non plus compte de l'état de fatigue ou de santé de l'utilisateur, et il existe un risque d'initier un mouvement exigeant un effort physique dépassant la capacité de l'utilisateur, entraînant une blessure et/ou une chute.

[0009] En outre, la démarche d'un utilisateur équipé d'une telle prothèse bionique de membre inférieur peut être perçue comme étant asymétrique, par une différence observable entre un pas effectué à l'aide de la prothèse bionique et un pas effectué par un membre valide. Un tel résultat peut mener à une forme d'exclusion sociale pour l'utilisateur, voire de discrimination quant à un handicap moteur ou tout simplement source de fatigue supplémentaire pour l'utilisateur.

[0010] Par conséquent, il existe un besoin de proposer un pilotage d'une prothèse bionique de membre inférieur tenant davantage compte des différences inhérentes à chaque utilisateur et à son environnement pour proposer un déplacement plus sûr et davantage fidèle à la démarche d'un membre inférieur valide.

PRESENTATION DE L'INVENTION

[0011] Pour parvenir à ce résultat, la présente invention concerne un procédé de commande d'une prothèse bionique de membre inférieur comprenant un pied prothétique configuré pour venir en contact avec un terrain ; un tibia prothétique ; un dispositif d'articulation motorisé liant le tibia prothétique et le pied prothétique ; le procédé, faisant suite à une instruction correspondant à une intention de mouvement, comprenant :

- la mesure de l'état actuel de la prothèse bionique, comprenant la mesure d'un vecteur directionnel du pied prothétique orienté substantiellement dans une direction longitudinale du pied prothétique et la mesure d'un vecteur directionnel du tibia prothétique orienté substantiellement dans une direction longitudinale du tibia prothétique par un ensemble d'accéléromètres ;
- le traitement d'un nuage de points tridimensionnel généré par une caméra de profondeur comprenant l'extraction d'un ensemble de points du nuage de points tridimensionnel correspondant au terrain et le calcul de la normale à une surface définie par ledit ensemble de points, désignée normale au terrain ;

- le calcul des mouvements à mettre en œuvre par la prothèse bionique ;
- la mise en mouvement de la prothèse bionique ;

le procédé étant caractérisé en ce que le calcul des mouvements à mettre en œuvre par la prothèse bionique comprend :

- la détermination d'une position d'origine du pied prothétique ;
- le calcul d'une première longueur de pas à partir d'une longueur de pas initiale prédéfinie ;
- la détermination d'une position de destination du pied prothétique ;
- le calcul d'un premier angle entre le vecteur directionnel du tibia prothétique et le vecteur directionnel du pied prothétique à la position de destination ;
- le calcul d'une deuxième longueur de pas à partir de la longueur de pas initiale, d'un coefficient proportionnel au premier angle ;
- la détermination d'une position de destination corrigée du pied prothétique ;
- le calcul d'un deuxième angle corrigé entre le vecteur directionnel du tibia prothétique et le vecteur directionnel du pied prothétique à la position de destination corrigée ;
- dans le cas où une différence entre le premier angle et le deuxième angle corrigé est comprise en dehors d'un intervalle formé par un seuil maximal et un seuil minimal, une itération des étapes précédentes est réalisée, le calcul de la première longueur de pas étant réalisé à partir de la longueur de pas initiale et d'un coefficient proportionnel au deuxième angle corrigé ;
- la génération d'une trajectoire entre la position d'origine du pied prothétique et la position de destination corrigée du pied prothétique.

[0012] L'invention permet de commander une prothèse bionique suite à une intention de mouvement d'un utilisateur en garantissant que le déplacement qui en résulte est sécurisé pour l'utilisateur et dans le champ de ses capacités physiques. La longueur du pas étant déterminée par itération en prenant notamment en compte l'angle entre le pied prothétique et le tibia prothétique, l'allure de marche de l'utilisateur est ainsi adaptée à la difficulté des obstacles à franchir. La trajectoire générée est également plus fidèle à une allure de pas d'un membre valide, générant ainsi un confort d'usage pour un utilisateur, comblant ainsi une éventuelle asymétrie de sa démarche.

[0013] La position d'origine du pied prothétique correspond à une position dans laquelle le vecteur directionnel du pied prothétique est substantiellement perpendiculaire à la normale au terrain lorsque le pied prothétique est en contact avec le terrain, au niveau d'une extrémité arrière du pied prothétique par rapport à la direction du mouvement.

[0014] La position de destination du pied prothétique correspond à l'intersection entre une sphère ayant pour centre la position d'origine du pied prothétique et un rayon égal à la première longueur de pas avec l'ensemble de points du nuage de points tridi-

mensionnel correspondant au terrain. De manière analogue, la position de destination corrigée du pied prothétique correspondant à l'intersection entre une sphère ayant pour centre la position d'origine du pied prothétique, de rayon égal à la deuxième longueur de pas avec l'ensemble de points du nuage de points tridimensionnel correspondant au terrain.

[0015] Avantagement, dans le cas où le deuxième angle corrigé est compris entre 88° et 92° , le procédé comprend :

- la détection d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse ;
- dans le cas de la présence d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse bionique, la mesure d'un giron de marche ;
- la comparaison du giron obtenu avec une longueur de pied prothétique prédéterminée ;
- dans le cas où le giron est inférieur à un seuil, par exemple 10 cm, une interruption du procédé de commande ;
- une reprise du procédé de commande à l'étape de génération d'une trajectoire.

[0016] Dans une telle configuration, la commande de prothèse bionique permet à un utilisateur de franchir un escalier dans le sens d'une montée ou dans le sens d'une descente, en tenant compte de l'éventualité selon laquelle le giron de marche est inférieur à la longueur du pied prothétique, situation qui présente un risque pour l'utilisateur.

[0017] La détection d'une marche est réalisée lorsque que des points d'un premier ensemble de points du nuage de points tridimensionnel sont compris dans un même premier plan, c'est-à-dire que la même coordonnée de chacun des points de l'ensemble de points est identique, en particulier la coordonnée identifiant la position d'altitude des points du nuage de points tridimensionnel. Dans le cas d'une pluralité de marches la prothèse bionique identifie au moins un deuxième ensemble de points du nuage de points tridimensionnel qui sont contenus dans un même au moins deuxième plan.

[0018] Le calcul d'un giron de marche est réalisé dans le cas d'une détection d'une pluralité de marches comme étant la distance entre le premier plan du premier ensemble de points du nuage de points tridimensionnel et le deuxième plan du deuxième ensemble de points du nuage de points tridimensionnel. Le calcul du giron est réitéré pour une marche suivante.

[0019] Une longueur de marche sensiblement inférieure à la longueur du pied prothétique, configurée en fonction de l'utilisateur et de la longueur effective du pied prothétique, aboutit à une interruption du procédé de commande. L'escalier est alors interprété comme un obstacle infranchissable tel qu'un mur et le risque de chute est écarté. L'utilisateur peut alors demander une assistance pour franchir l'obstacle, ou bien choisir d'emprunter un autre itinéraire.

- [0020] Avantageusement, la génération de la trajectoire entre la position d'origine du pied prothétique et la position de destination corrigée du pied prothétique comprend :
- la génération d'une trajectoire de poussée ;
 - la génération d'une trajectoire de balancier directement postérieure à la trajectoire de poussée.
- [0021] La division de la génération de trajectoire en deux trajectoires aux mouvements distincts permet d'améliorer la précision de la trajectoire globale, pour que cette dernière encore davantage fidèle à une allure de pas d'un membre valide.
- [0022] Avantageusement, la génération de la trajectoire entre la position d'origine du pied prothétique et la position de destination corrigée du pied prothétique comprend :
- la génération d'une trajectoire de poussée ;
 - la génération d'une trajectoire de balancier directement postérieure à la trajectoire de poussée.
- [0023] La trajectoire du pied prothétique est associée aux différentes positions successives de l'extrémité arrière du pied. L'angle de poussée et l'impulsion sont calculés à partir de paramètres physiques compris parmi la liste suivante : l'âge d'un utilisateur ; la masse d'un utilisateur ; la taille d'un utilisateur ; un coefficient de fatigue ; un coefficient de vitesse de marche ; un coefficient d'état de surface du sol. Les paramétrages de l'angle de poussée et de l'impulsion peuvent également être réalisés indépendamment, dans un souci d'adaptation au profil de l'utilisateur.
- [0024] La force mesurée par le capteur de force du tibia correspond à la réaction du terrain au poids de la prothèse prothétique, d'une partie au moins de la réaction du terrain au poids de l'utilisateur et d'une réaction du terrain à une impulsion donnée par le dispositif d'articulation motorisé. Lorsque le mouvement suivant la trajectoire de poussée est démarré, la valeur de la force mesurée par le capteur de force diminue progressivement, ce qui correspond en pratique au transfert du poids de l'utilisateur, du membre inférieur équipé de la prothèse bionique vers l'autre membre inférieur de l'utilisateur. On s'assure ainsi que le contact entre le pied prothétique et le terrain n'est rompu que lorsque l'autre membre inférieur porte une partie acceptable du poids de l'utilisateur pour garantir la stabilité.
- [0025] Avantageusement, la trajectoire de balancier comprend successivement :
- un mouvement dans lequel l'extrémité arrière du pied s'élève tant que l'extrémité avant du pied prothétique se situe à une hauteur par rapport au terrain inférieure à une hauteur de garde ;
 - un mouvement dans lequel l'extrémité avant du pied prothétique pivote dans la direction du mouvement suivant un angle de balancier strictement inférieur au deuxième angle corrigé, de préférence strictement inférieur au deuxième angle corrigé -15 ;

- un mouvement dans lequel l'extrémité arrière du pied pivote autour du dispositif d'articulation motorisé dans la direction du mouvement ;
- un mouvement dans lequel le pied prothétique s'abaisse vers le terrain jusqu'à établir un contact avec le terrain au niveau de la position de destination corrigée du pied prothétique ; l'extrémité avant du pied prothétique pivote pour venir en contact avec le terrain.

[0026] En garantissant une hauteur minimum de l'extrémité avant du pied prothétique, désignée hauteur de garde, on garantit que le pied prothétique se tient à une distance acceptable du terrain pendant l'intégralité des mouvements de la trajectoire de balancier, c'est-à-dire que le risque pour l'extrémité avant du pied prothétique de frotter un obstacle, par exemple le terrain, et de faire trébucher l'utilisateur, est grandement réduit.

[0027] Avantageusement, le procédé comprend, antérieurement à l'étape de calcul des mouvements à mettre en œuvre, une étape de mesure de la longueur de pas initiale à partir d'une longueur de pas d'un membre inférieur valide.

[0028] En mesurant une telle longueur sur le pas d'un membre inférieur valide, on s'assure ainsi que la longueur de pas initiale utilisée dans la commande de la prothèse bionique convient naturellement à l'utilisateur, et renforce davantage la symétrie de sa démarche.

[0029] Avantageusement, la longueur de pas initiale est déterminée à partir de paramètres physiques compris parmi la liste suivante : l'âge d'un utilisateur ; la masse d'un utilisateur ; la taille d'un utilisateur ; un coefficient de fatigue ; un coefficient de vitesse de marche ; un coefficient d'état de surface du sol.

[0030] Avec une méthode de définition secondaire de la longueur de pas initiale, on peut ainsi palier un éventuel dysfonctionnement lors de l'étape de mesure d'un pas de membre inférieur valide. La détermination de la longueur de pas initiale à partir de paramètres physiques est particulièrement avantageuse dans le cas où l'utilisateur est équipé de prothèse bionique sur l'intégralité de ses membres inférieurs ou bien par soucis économique.

[0031] Avantageusement, le seuil maximal est inférieur ou égal à 4° , de préférence encore inférieur ou égal à 2° et le seuil minimal est supérieur à -4° , de préférence encore supérieur ou égal à -2° , le seuil maximal étant supérieur au seuil minimal.

[0032] Selon un autre aspect de l'invention, celle-ci a trait à une prothèse bionique de membre inférieur comprenant :

- un segment distal prothétique inférieur, autrement dit un pied prothétique configuré pour venir en contact avec un terrain ;
- un segment moyen prothétique, autrement dit un tibia prothétique ;
- un dispositif d'articulation motorisé liant le tibia prothétique et le pied pro-

thétique ;

- une unité de commande configurée pour contrôler le dispositif d'articulation motorisé ;
- au moins une caméra de profondeur adaptée pour générer un nuage de points tridimensionnel de l'environnement de la prothèse bionique comprenant le terrain l'unité de commande étant configurée pour traiter le nuage de points tridimensionnel afin de détecter le terrain ou, respectivement, l'objet à saisir, et pour commander ledit au moins un dispositif d'articulation motorisé de sorte à adapter le positionnement du segment distal prothétique par rapport au terrain ou, respectivement, par rapport à l'objet à saisir.

[0033] La prothèse bionique comprend, de manière préférée, un ensemble d'accéléromètres apte à mesurer un état actuel de la prothèse bionique.

[0034] La prothèse bionique comprend, le cas échéant, un segment proximal prothétique. Le segment proximal prothétique correspond en particulier à un fémur prothétique.

PRESENTATION DES FIGURES

[0035] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et se référant aux dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs, dans lesquels des références identiques sont données à des objets semblables et sur lesquels :

[0036] [Fig.1] : la [Fig.1] est une représentation schématique d'une vue de la prothèse bionique de membre inférieur de l'état de la technique ;

[0037] [Fig.2] : la [Fig.2] est une représentation schématique du procédé de commande de la prothèse bionique de membre inférieur selon un aspect du premier mode de réalisation de l'invention ;

[0038] [Fig.3] : la [Fig.3] est une représentation schématique de la prothèse bionique en cours d'exécution d'une première série d'étapes du procédé de commande ;

[0039] [Fig.4] : la [Fig.4] est une représentation schématique de la prothèse bionique en cours d'exécution d'une deuxième série d'étapes du procédé de commande ;

[0040] [Fig.5] : la [Fig.5] est une représentation schématique de la prothèse bionique en cours d'exécution d'une troisième série d'étapes du procédé de commande ;

[0041] [Fig.6] : la [Fig.6] est une représentation schématique de la prothèse bionique en cours d'exécution d'une série d'étapes du procédé de commande selon un autre mode de réalisation ;

[0042] [Fig.7A] : la [Fig.7A] est une représentation schématique de la prothèse bionique en cours d'exécution d'une série d'étapes du procédé de commande selon un autre mode de réalisation ;

[0043] [Fig.7B] : la [Fig.7B] est une représentation schématique de la prothèse bionique en

cours d'exécution d'une série d'étapes du procédé de commande selon le même mode de réalisation que la [Fig.7A], dans une configuration différente de terrain ;

[0044] Il faut noter que les figures exposent l'invention de manière détaillée pour permettre de mettre en œuvre l'invention ; bien que non limitatives, lesdites figures servent notamment à mieux définir l'invention le cas échéant.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0045] Selon un aspect de l'invention, l'invention concerne un procédé de commande de prothèse bionique et sera décrite ci-après dans le contexte d'une prothèse bionique myoélectrique pour une personne amputée du membre inférieur ou supérieur. L'invention n'étant pas limitée à ce cadre d'application, elle peut également être adaptée à toute prothèse bionique du membre inférieur ou supérieur. L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation précédemment décrits mais s'étend à tout mode de réalisation conforme à son esprit.

[0046] En référence à la [Fig.1], la prothèse bionique 1 de membre inférieur selon l'état de la technique comprend un pied prothétique 11 à une extrémité libre de la prothèse bionique 1 et adapté pour venir en contact avec un terrain 2 ; un tibia prothétique 12 ; au moins un dispositif d'articulation motorisé 13, un premier dudit au moins un dispositif d'articulation motorisé 13 étant relié mécaniquement d'une part au pied prothétique 11 et d'autre part au tibia prothétique 12 ; une unité de commande 14 configurée pour contrôler ledit au moins un dispositif d'articulation motorisé 13 à partir de signaux de commande correspondant à une intention de mouvement ; au moins une caméra de profondeur 15 adaptée pour générer un nuage de points tridimensionnel de l'environnement du pied prothétique 11, comprenant le terrain 2, l'unité de commande 14 étant configurée pour traiter le nuage de points tridimensionnel afin de détecter le terrain 2 et pour commander ledit au moins un dispositif d'articulation motorisé 13 de sorte à adapter le positionnement du pied prothétique 11 par rapport au terrain 2.

[0047] En particulier, le terrain est défini comme une surface sur laquelle un utilisateur prend appui pour se déplacer. La surface peut notamment être plane comme un sol ou une marche, ou encore être inclinée. De plus, la surface peut également être accidentée et comprendre des obstacles, ou des états de surfaces différents et des aspérités (trous, cailloux, etc.) qu'il est avantageux d'identifier.

[0048] De plus, la prothèse bionique peut comprendre un capteur de profondeur fixé à un membre valide d'un utilisateur, le capteur étant adapté pour mesurer une longueur de pas de membre valide.

[0049] En outre, le pied prothétique 11 présente notamment un vecteur directionnel du pied 111 orienté substantiellement dans une direction longitudinale du pied prothétique 11

et un vecteur directionnel 121 orienté substantiellement dans une direction longitudinale du tibia prothétique vers le pied prothétique 11. La prothèse bionique 1 de membre inférieur peut alors comprendre un ensemble d'accéléromètres apte à mesurer le vecteur directionnel du pied 111 et le vecteur direction du tibia 121. Le vecteur directionnel du pied 111 et le vecteur directionnel du tibia 121 peut notamment être défini par rapport à un système de référence défini par trois axes correspondant à une position de référence du pied prothétique 11.

[0050] En référence à la [Fig.2], le procédé de commande de la prothèse bionique de membre inférieur, suite à une instruction 3 correspondant à une intention de mouvement, comprend :

- la mesure E11 de l'état actuel de la prothèse bionique, comprenant la mesure d'un vecteur directionnel 111 du pied prothétique 11 orienté substantiellement dans une direction longitudinale du pied prothétique 11 et la mesure d'un vecteur directionnel 121 du tibia prothétique 12 orienté substantiellement dans une direction longitudinale du tibia prothétique 12 par un ensemble d'accéléromètres ;
- le traitement E12 d'un nuage de points tridimensionnel généré par une caméra de profondeur comprenant l'extraction d'un ensemble de points du nuage de points tridimensionnel correspondant au terrain 2 et le calcul de la normale à une surface définie par ledit ensemble de points, désignée normale au terrain ;
- la détermination E21 d'une position d'origine P_o du pied prothétique ;
- le calcul E22 d'une première longueur L_1 de pas à partir d'une longueur de pas initiale prédéfinie ;
- la détermination E23 d'une position de destination P_f du pied prothétique 11 ;
- le calcul E31 d'un premier angle A_1 entre le vecteur directionnel 121 du tibia prothétique 12 et le vecteur directionnel 111 du pied prothétique 11 à la position de destination P_f ;
- le calcul E32 d'une deuxième longueur L_2 de pas à partir de la longueur de pas initiale, d'un coefficient proportionnel au premier angle A_1 ;
- la détermination E33 d'une position de destination corrigée P_f^* du pied prothétique 11 ;
- le calcul E34 d'un deuxième angle corrigé A_2 entre le vecteur directionnel 121 du tibia prothétique 12 et le vecteur directionnel 111 du pied prothétique 11 à la position de destination corrigée P_f^* ;
- dans le cas E35 où une différence entre le premier angle A_1 et le deuxième angle corrigé A_2 est comprise en dehors d'un intervalle formé par un seuil maximal et un seuil minimal, une itération des étapes précédentes est réalisée, le calcul de la première longueur L_1 de pas étant réalisé à partir de la longueur

de pas initiale et d'un coefficient proportionnel au deuxième angle corrigé A_2 ;

- la génération (E4) d'une trajectoire entre la position d'origine P_o du pied prothétique 11 et la position de destination corrigée P_f^* du pied prothétique 11.
- la mise en mouvement 4 de la prothèse bionique 1 ;

[0051] Les figures 3 à 5 illustrent les étapes E21 à E35 telles que déterminées par l'unité de commande 14 pour commander la mise en mouvement de la prothèse bionique 1, en montrant pour chacune des étapes la position initiale de la prothèse bionique 1 avant intention 3 de mouvement et la position finale de la prothèse bionique 1 après mise en mouvement 4.

[0052] La détermination E21 de la position d'origine P_o du pied prothétique 11 correspond à une position dans laquelle le vecteur directionnel 111 du pied prothétique 11 est substantiellement perpendiculaire à la normale au terrain lorsque le pied prothétique 11 est en contact avec le terrain 2, au niveau d'une extrémité arrière 112 du pied prothétique par rapport à la direction du mouvement.

[0053] Dans le calcul E22 de la première longueur L_1 de pas, la longueur de pas initiale est de préférence déterminée à partir de paramètres physiques compris parmi la liste suivante : l'âge d'un utilisateur ; la masse d'un utilisateur ; la taille d'un utilisateur ; un coefficient de fatigue ; un coefficient de vitesse de marche ; un coefficient d'état de surface du sol.

[0054] La détermination E23 de la position de destination P_f du pied prothétique 11 correspond à l'intersection entre une sphère ayant pour centre la position d'origine P_o du pied prothétique 11 et un rayon égal à la première longueur L_1 de pas avec l'ensemble de points du nuage de points tridimensionnel correspondant au terrain 2.

[0055] Le calcul E31 premier angle A_1 présente l'avantage d'être identique même en présence d'une pente du terrain 2 ou d'une quelconque variation progressive du dénivelé. En pratique, cela signifie que la commande de prothèse bionique réalise les mêmes opérations pour mettre en mouvement la prothèse bionique sur un terrain parfaitement plat ou sur un terrain présentant une pente, augmentant significativement la robustesse du procédé de commande, comme décrit sur la [Fig.4].

[0056] De la même manière, dans le cadre du calcul E32 de la deuxième longueur L_2 de pas à partir de la longueur de pas initiale et d'un coefficient proportionnel au deuxième angle A_2 , la commande de prothèse bionique réalise les mêmes opérations pour mettre en mouvement la prothèse bionique sur un terrain parfaitement plat ou sur un terrain présentant une pente, augmentant là aussi sensiblement la robustesse du procédé de commande.

[0057] La génération de la trajectoire entre la position d'origine P_o du pied prothétique 11 et la position de destination corrigée P_f^* du pied prothétique 11 comprend la génération

d'une trajectoire de poussée T1 et la génération d'une trajectoire de balancier T2 directement postérieure à la trajectoire de poussée, illustrées par la [Fig.6] montrant les configurations successives de la prothèse bionique 1.

[0058] La trajectoire de poussée T1 comprend un mouvement initié par une impulsion du dispositif d'articulation motorisé 13, de l'extrémité arrière 112 du pied prothétique 11 décrivant un arc de cercle autour d'une extrémité avant 113 du pied prothétique 11 par rapport à la direction du mouvement, suivant un premier angle de poussée A3, de manière à rompre le contact entre le pied prothétique 11 et le terrain 2 tant qu'une force mesurée par un capteur de force du tibia prothétique 12 est supérieure à un seuil prédéterminé.

[0059] La trajectoire de balancier T2 comprend successivement : un mouvement dans lequel l'extrémité arrière 112 du pied prothétique 11 s'élève tant que l'extrémité avant 113 du pied prothétique 11 se situe à une hauteur H1 par rapport au terrain 2 inférieure à une hauteur de garde H ; un mouvement dans lequel l'extrémité avant 113 du pied prothétique 11 pivote dans la direction du mouvement suivant un angle de balancier A4 strictement inférieur au deuxième angle corrigé A2, de préférence strictement inférieur au deuxième angle corrigé A2 -15° ; un mouvement dans lequel l'extrémité arrière 112 du pied prothétique 11 pivote autour du dispositif d'articulation motorisé 13 dans la direction du mouvement ; un mouvement dans lequel le pied prothétique 11 s'abaisse vers le terrain 2 jusqu'à établir un contact avec le terrain 2 au niveau de la position de destination corrigée Pf* du pied prothétique 11 ; l'extrémité avant 113 du pied prothétique 11 pivote pour venir en contact avec le terrain 2. La vitesse d'exécution des mouvements suivant les trajectoires T1 et T2 est paramétrable, en commandant notamment une vitesse de rotation du dispositif d'articulation motorisé 13.

[0060] Les figures 7A et 7B décrivent des modes de réalisation alternatif selon un cas d'utilisation du procédé de la prothèse bionique 1 face à une variation brutale du dénivelé du terrain 2, telle qu'une marche ou une pluralité de marches d'un escalier, dans le sens d'une élévation de l'altitude pour la [Fig.7A] et d'une diminution de l'altitude pour la [Fig.7B]. Dans le cas où le deuxième angle corrigé est compris entre 88° et 92°, le procédé comprend :

- la détection d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse ;
- dans le cas de la présence d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse bionique, la mesure d'un giron G de marche ;
- la comparaison du giron G mesuré avec une longueur Lp de pied prothétique 11 prédéterminée ;
- dans le cas où le giron G est inférieur à un seuil, par exemple 10 cm, de la longueur Lp de pied prothétique 11, une interruption du procédé de commande ;

- une reprise du procédé de commande à l'étape de génération E4 d'une trajectoire.

[0061] La détection d'une marche est réalisée lorsque que des points d'un premier ensemble de points du nuage de points tridimensionnel sont compris dans un même premier plan P1, c'est-à-dire que la même coordonnée de chacun des points de l'ensemble de points est identique, en particulier la coordonnée identifiant la position d'altitude des points du nuage de points tridimensionnel. Dans le cas d'une pluralité de marches la prothèse bionique identifie au moins un deuxième ensemble de points du nuage de points tridimensionnel qui sont contenus dans un même au moins deuxième plan P2. Le calcul du giron de marche G est réalisé dans le cas d'une détection d'une pluralité de marches comme étant la plus petite distance entre le premier plan P1 du premier ensemble de points du nuage de points tridimensionnel et le deuxième plan P2 du deuxième ensemble de points du nuage de points tridimensionnel. Le calcul du giron G est réitéré pour une marche suivante.

[0062] On notera par ailleurs que l'invention n'est pas limitée au mode de réalisation décrit précédemment. Il apparaîtra en effet à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées au mode de réalisation décrit ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

[0063] Dans la présentation détaillée de l'invention qui est faite précédemment, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant l'invention au mode de réalisation exposé dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les équivalents dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en œuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) de membre inférieur comprenant un pied prothétique (11) configuré pour venir en contact avec un terrain (2) ; un tibia prothétique (12) ; le cas échéant un fémur prothétique ; un dispositif d'articulation motorisé (13) liant le tibia prothétique (12) et le pied prothétique (11) ; le procédé, faisant suite à une instruction correspondant à une intention (3) de mouvement, comprenant :

- la mesure (E11) de l'état actuel de la prothèse bionique, comprenant la mesure d'un vecteur directionnel (111) du pied prothétique (11) orienté substantiellement dans une direction longitudinale du pied prothétique (11) et la mesure d'un vecteur directionnel (121) du tibia prothétique orienté substantiellement dans une direction longitudinale du tibia prothétique (12) par un ensemble d'accéléromètres ;
- le traitement (E12) d'un nuage de points tridimensionnel généré par une caméra de profondeur comprenant l'extraction d'un ensemble de points du nuage de points tridimensionnel correspondant au terrain (2) et le calcul de la normale à une surface définie par ledit ensemble de points, désignée normale au terrain ;
- le calcul des mouvements à mettre en œuvre par la prothèse bionique ;
- la mise en mouvement (4) de la prothèse bionique (1) ;

le procédé étant caractérisé en ce que le calcul des mouvements à mettre en œuvre par la prothèse bionique comprend :

- la détermination (E21) d'une position d'origine (Po) du pied prothétique ;
- le calcul (E22) d'une première longueur (L1) de pas à partir d'une longueur de pas initiale prédéfinie ;
- la détermination (E23) d'une position de destination (Pf) du pied prothétique (11) ;
- le calcul (E31) d'un premier angle (A1) entre le vecteur directionnel (121) du tibia prothétique (12) et le vecteur di-

- rectionnel (111) du pied prothétique (11) à la position de destination (Pf) ;
- le calcul (E32) d'une deuxième longueur (L2) de pas à partir de la longueur de pas initiale, d'un coefficient proportionnel au premier angle ;
 - la détermination (E33) d'une position de destination corrigée (Pf*) du pied prothétique ;
 - le calcul (E34) d'un deuxième angle corrigé (A2) entre le vecteur directionnel (121) du tibia prothétique (12) et le vecteur directionnel (111) du pied prothétique (11) à la position de destination corrigée (Pf*) ;
 - dans le cas (E35) où une différence entre le premier angle (A1) et le deuxième angle corrigé (A2) est comprise en dehors d'un intervalle formé par un seuil maximal et un seuil minimal, une itération des étapes précédentes est réalisée, le calcul de la première longueur (L1) de pas étant réalisé à partir de la longueur de pas initiale et d'un coefficient proportionnel au deuxième angle corrigé (A2) ;
 - la génération d'une trajectoire (E4) entre la position d'origine (Po) du pied prothétique (11) et la position de destination corrigée (Pf*) du pied prothétique (11).

[Revendication 2]

Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que dans le cas où le deuxième angle corrigé (A2) est compris entre 88° et 92° , le procédé comprend :

- la détection d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse (1) ;
- dans le cas de la présence d'une marche ou d'une pluralité de marches face à la prothèse bionique (1), la mesure d'un giron (G) de marche ;
- la comparaison du giron (G) obtenu avec une longueur (Lp) de pied prothétique (11) prédéterminée ;
- dans le cas où le giron (G) est inférieur à un seuil, notamment 10 cm, une interruption du procédé de commande ;
- une reprise du procédé de commande à l'étape de génération (E4) d'une trajectoire.

[Revendication 3] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la génération (E4) de la trajectoire entre la position d'origine (Po) du pied prothétique et la position de destination corrigée (Pf*) du pied prothétique comprend :

- la génération d'une trajectoire de poussée (T1) ;
- la génération d'une trajectoire de balancier (T2) directement postérieure à la trajectoire de poussée (T1).

[Revendication 4] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon la revendication 3, caractérisé en ce que la trajectoire de poussée (T1) comprend un mouvement, initié par une impulsion du dispositif d'articulation motorisé, d'une extrémité arrière (112) du pied prothétique (11) décrivant un arc de cercle autour d'une extrémité avant (113) du pied prothétique (11) par rapport à la direction du mouvement, suivant un premier angle de poussée (A3), de manière à rompre le contact entre le pied prothétique (11) et le terrain (2) tant qu'une force mesurée par un capteur de force du tibia prothétique est supérieure à un seuil prédéterminé.

[Revendication 5] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon la revendication 3 ou 4 caractérisé en ce que la trajectoire de balancier comprend successivement :

- un mouvement dans lequel l'extrémité arrière (112) du pied prothétique (11) s'élève tant que l'extrémité avant (113) du pied (11) prothétique se situe à une hauteur (H1) par rapport au terrain (2) inférieure à une hauteur de garde (H) ;
- un mouvement dans lequel l'extrémité avant (113) du pied prothétique (11) pivote dans la direction du mouvement suivant un angle de balancier (A4) strictement inférieur au deuxième angle corrigé (A2), de préférence strictement inférieur au deuxième angle corrigé (A2) -15 ;
- un mouvement dans lequel l'extrémité arrière (112) du pied prothétique (11) pivote autour du dispositif d'articulation motorisé (13) dans la direction du mouvement ;
- un mouvement dans lequel le pied prothétique (11) s'abaisse vers le terrain jusqu'à établir un contact avec le terrain (2) au niveau de la position de destination corrigée (Pf*) du pied pro-

thétique (11) ; l'extrémité avant (113) du pied prothétique (11) pivote pour venir en contact avec le terrain (2).

- [Revendication 6] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend antérieurement à l'étape de calcul des mouvements à mettre en œuvre une étape de mesure de la longueur de pas initiale à partir d'une longueur de pas d'un membre inférieur valide.
- [Revendication 7] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la longueur de pas initiale est déterminée à partir de paramètres physiques compris parmi la liste suivante : l'âge d'un utilisateur ; la masse d'un utilisateur ; la taille d'un utilisateur ; un coefficient de fatigue ; un coefficient de vitesse de marche ; un coefficient d'état de surface du sol.
- [Revendication 8] Procédé de commande d'une prothèse bionique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le seuil maximal est inférieur ou égal à 4° , de préférence encore inférieur ou égal à 2° et le seuil minimal est supérieur à -4° , de préférence encore supérieur ou égal à -2° , le seuil maximal étant supérieur au seuil minimal.

[Fig. 1]

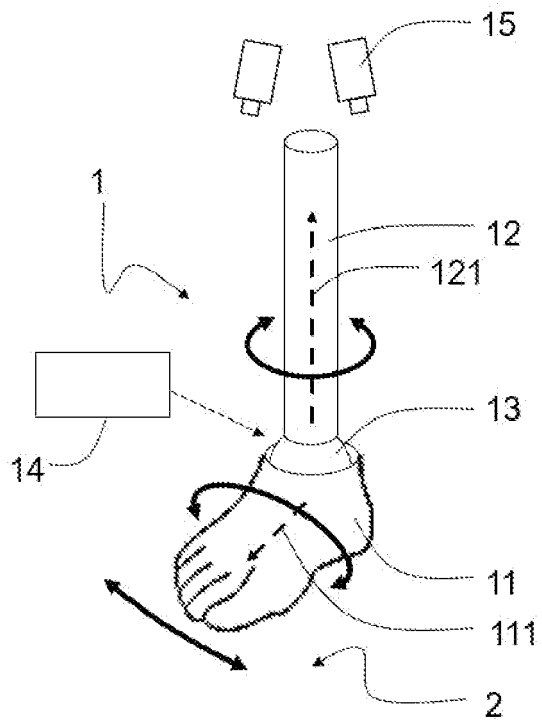


FIG 1

[Fig. 2]

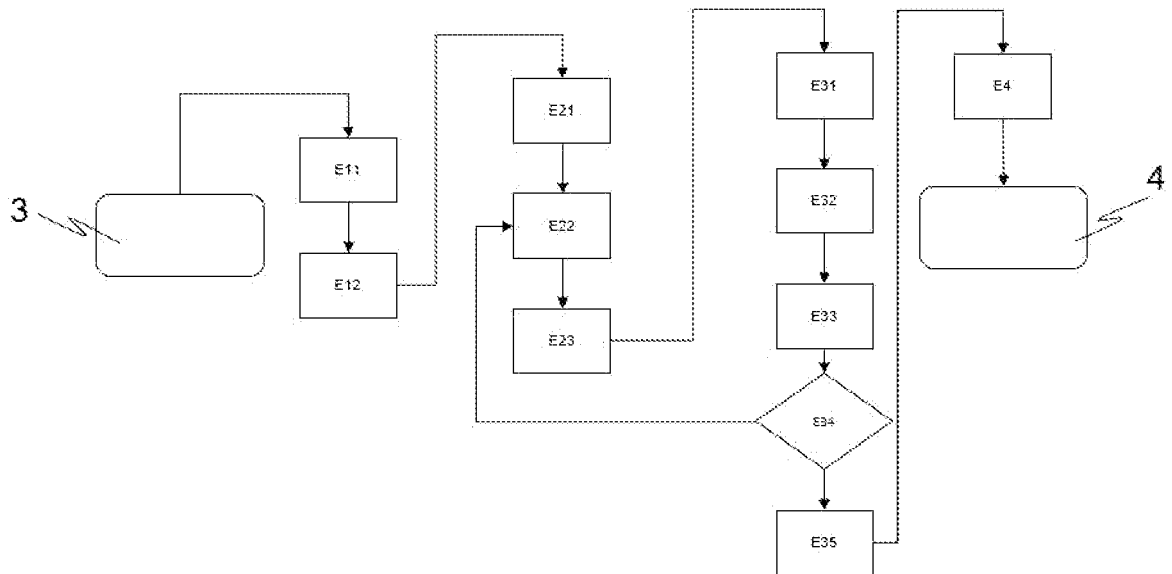


FIG 2

[Fig. 3]

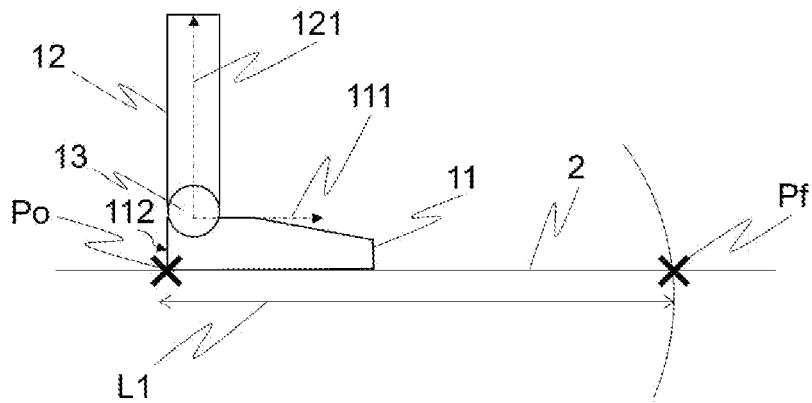


FIG 3

[Fig. 4]

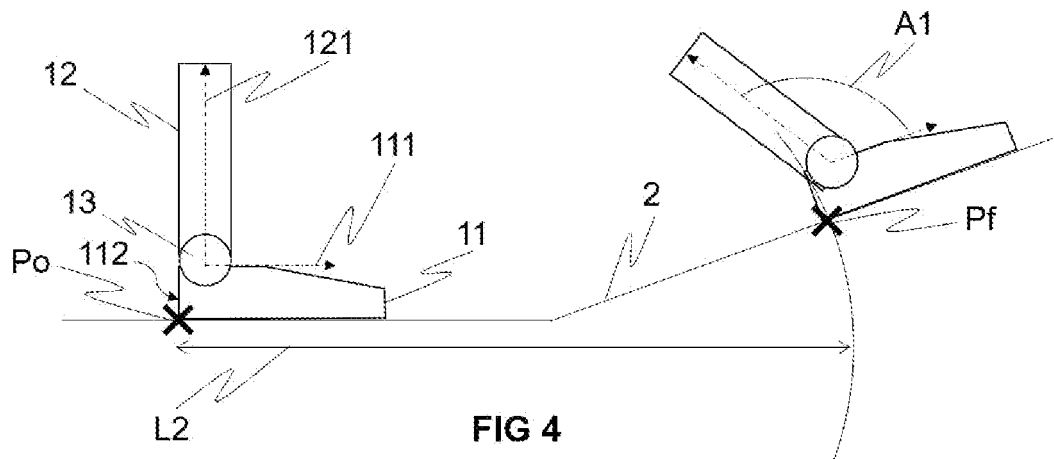


FIG 4

[Fig. 5]

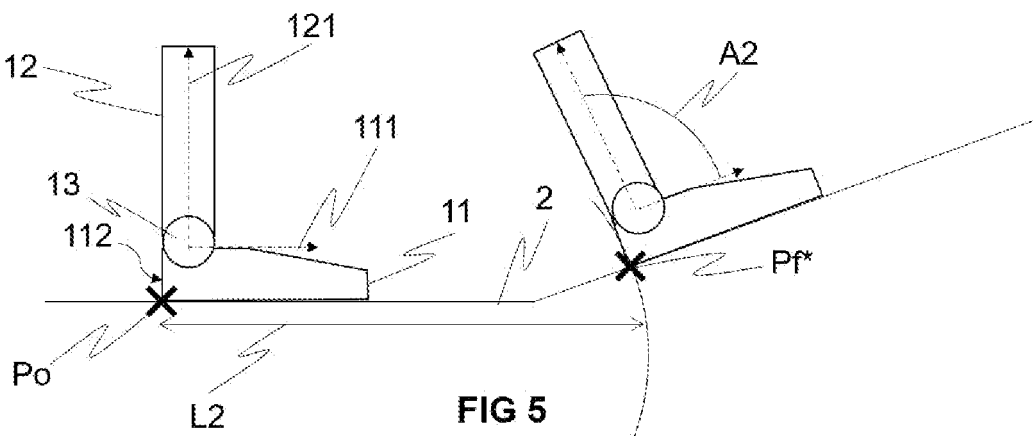


FIG 5

[Fig. 6]

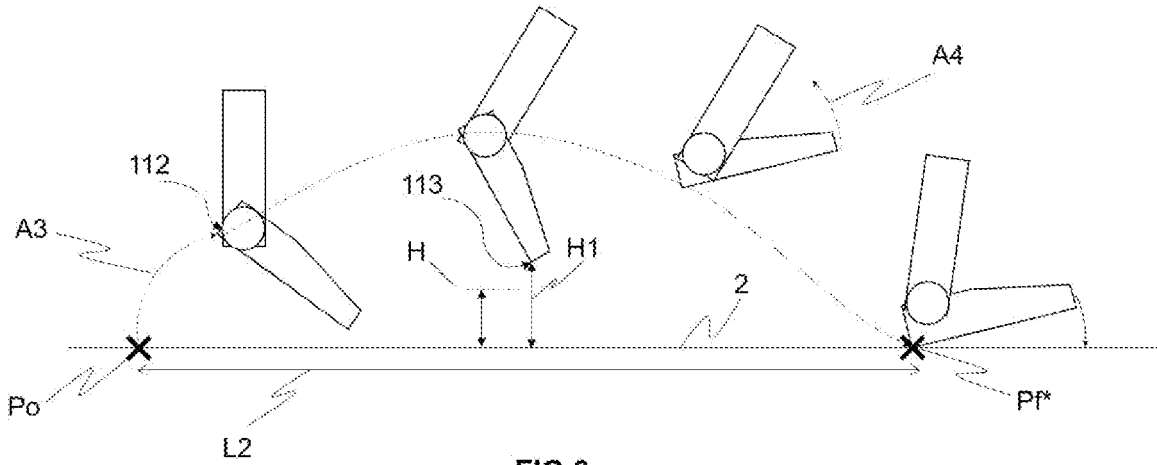


FIG 6

[Fig. 7A]

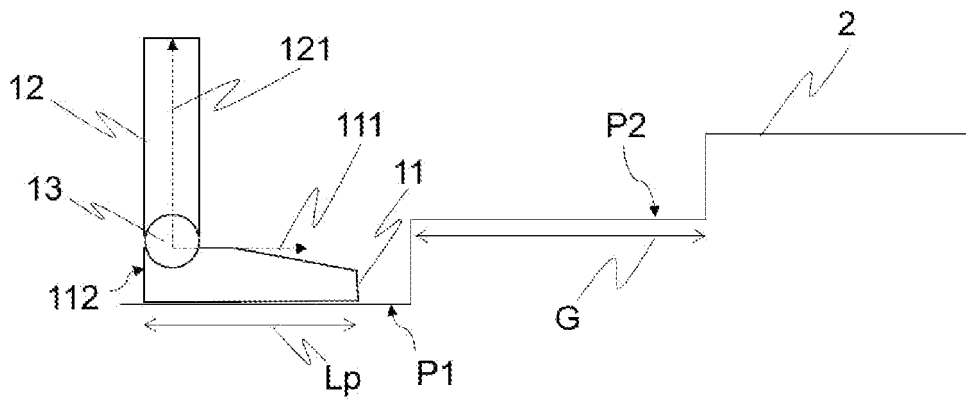


FIG 7A

[Fig. 7B]

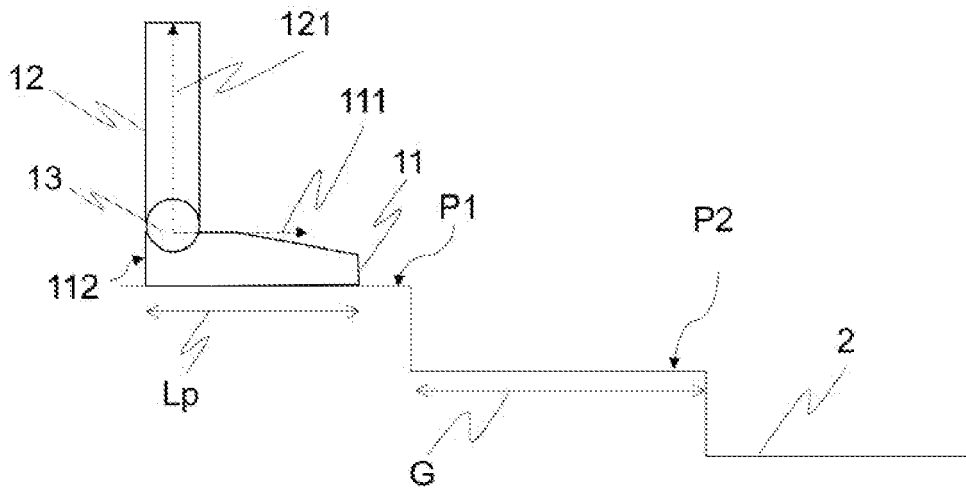


FIG 7B

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

CN 114 145 890 A (CHINESE SCIENCE AND
TECHNOLOGY UNIV) 8 mars 2022 (2022-03-08)

US 2022/008227 A1 (WILL CHRISTIAN [DE] ET
AL) 13 janvier 2022 (2022-01-13)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT