



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
11.04.2018 Bulletin 2018/15

(51) Int Cl.:
B66C 13/06 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **17190875.9**

(22) Date de dépôt: **13.09.2017**

(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
Etats de validation désignés:
MA MD

(72) Inventeurs:
• **CLAEYS, Xavier**
69006 LYON (FR)
• **BONNABEL, Silvère**
92100 BOULOGNE BILLANCOURT (FR)

(74) Mandataire: **Chevalier, Renaud Philippe et al**
Cabinet Germain & Maureau
BP 6153
69466 Lyon Cedex 06 (FR)

(30) Priorité: **05.10.2016 FR 1659607**

(71) Demandeur: **Manitowoc Crane Group France**
69570 Dardilly (FR)

(54) **PROCÉDÉ DE COMMANDE DE GRUE ANTI-BALLANT À FILTRE DU TROISIÈME ORDRE**

(57) La présente invention concerne un procédé de commande du déplacement d'une charge (1) suspendue à un point d'accroche (H) d'un engin de levage (2), ledit procédé comprenant une étape (a) d'acquisition au cours de laquelle on acquiert une « consigne de pilotage » (V_u) représentative de la vitesse de déplacement que le conducteur souhaite conférer à la charge (1) suspendue, puis une étape (b) de traitement au cours de laquelle on élabore, à partir de ladite consigne de pilotage (V_u), une consigne dite « consigne d'exécution » (V_{trol}) qui est ap-

pliquée à un moteur d'entraînement (7, 8) afin de déplacer la charge suspendue (1), l'étape (b) de traitement comportant une sous-étape (b4) de régularisation C^3 par filtrage du troisième ordre au cours de laquelle on applique à la consigne de pilotage (V_u) un filtre du troisième ordre (F_3) afin de générer une consigne de pilotage filtrée (V_f) de classe de régularité C^3 , puis l'on définit la consigne d'exécution (V_{trol}) à partir de ladite consigne de pilotage filtrée (V_f).

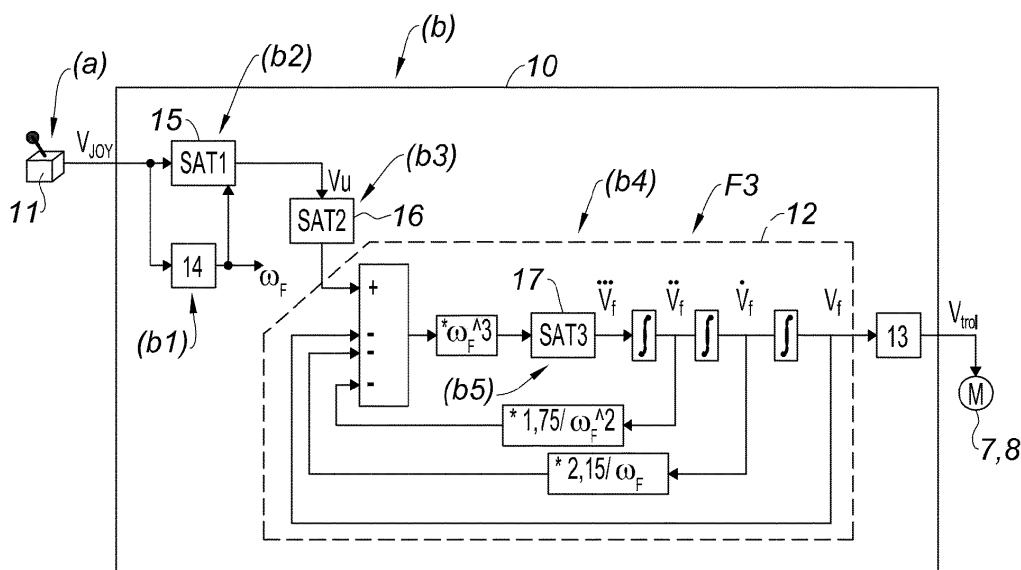


Fig. 4

Description

[0001] La présente invention se rapporte au domaine général des engins de levage, du genre grues, et plus particulièrement du genre grues à tour, qui comportent un point d'accroche mobile, du genre chariot, auquel on peut suspendre une charge à déplacer, dite « charge suspendue », et qui sont équipés d'un système de pilotage permettant de réaliser la mise en mouvement et le contrôle du déplacement de ladite charge suspendue.

[0002] La présente invention se rapport plus particulièrement aux procédés de commande destinés à gérer le système de pilotage de tels engins de levage.

[0003] Généralement, de tels procédés de commande, qui sont destinés à fournir une assistance au pilotage de l'engin, comprennent une étape d'acquisition d'une consigne de pilotage, au cours de laquelle on recueille la consigne de vitesse qui est exprimée par le conducteur de l'engin de levage et qui correspond à la vitesse que ledit conducteur souhaite conférer à la charge suspendue, puis une étape de traitement au cours de laquelle on élabore, à partir de ladite consigne de pilotage, une consigne d'exécution qui est appliquée au(x) moteur(s) d'entraînement qui permettent de déplacer ladite charge suspendue.

[0004] En outre, afin d'assurer la précision et la sécurité des opérations de transport de la charge suspendue, les procédés de commande connus cherchent généralement à contrôler, et plus particulièrement à limiter, l'amplitude des oscillations pendulaires, ou « ballant », auxquelles la charge suspendue peut être sujette lors des mouvements du chariot.

[0005] A cet effet, il est en particulier connu de combattre le ballant par un asservissement en boucle fermée, dans lequel on mesure les valeurs réelles de position et de vitesse du chariot, ainsi que la valeur de l'angle de ballant de la charge, pour pouvoir générer une correction de la consigne qui est appliquée aux moteurs qui actionnent le chariot et qui vise à réduire ledit ballant.

[0006] Si un tel système permet effectivement d'atténuer le ballant, il peut toutefois présenter certains inconvénients.

[0007] En effet, un tel asservissement en boucle fermée impose la mise en oeuvre de nombreux capteurs, destinés par exemple à mesurer l'angle réel de ballant, ce qui accroît la complexité, et par conséquent le coût, ainsi que le risque de défaillance, du système de pilotage, et plus globalement de l'engin de levage équipé dudit système de pilotage.

[0008] En outre, la complexité du modèle mathématique utilisé par un tel système de pilotage, ainsi que la quantité des données à mesurer et à traiter, tendent à mobiliser des ressources relativement importantes et coûteuses en termes de puissance de calcul, de mémoire, et d'énergie.

[0009] Par ailleurs, l'assistance au pilotage ainsi offerte peut avoir tendance à amortir excessivement les réponses (réactions) de l'engin de levage aux consignes du conducteur (ou « grutier »), en faussant ainsi la perception intuitive du comportement de l'engin que peut avoir ledit conducteur, et notamment en donnant audit conducteur la désagréable impression que l'engin manque de réactivité et n'exécute pas fidèlement ses consignes.

[0010] Les objets assignés à l'invention visent par conséquent à remédier aux inconvénients susmentionnés et à proposer un nouveau procédé de commande du déplacement d'une charge suspendue qui assure un déplacement à la fois rapide et doux de la charge suspendue, avec une maîtrise efficace du ballant, qui procure au conducteur un ressenti fidèle permettant un pilotage très libre, réactif et relativement intuitif, et qui soit, malgré ces performances, particulièrement simple et économe à mettre en oeuvre.

[0011] Les objets assignés à l'invention sont atteints au moyen d'un procédé de commande du déplacement d'une charge suspendue à un point d'accroche d'un engin de levage, ledit procédé comprenant une étape (a) d'acquisition de consigne de pilotage, au cours de laquelle on acquiert une consigne dite « consigne de pilotage » qui est représentative d'une vitesse de déplacement que le conducteur de l'engin de levage souhaite conférer à la charge suspendue, puis une étape (b) de traitement au cours de laquelle on élabore, à partir de ladite consigne de pilotage, une consigne dite « consigne d'exécution » qui est destinée à être appliquée à au moins un moteur d'entraînement afin de déplacer la charge suspendue, le procédé étant caractérisé en ce que l'étape (b) de traitement comporte une sous-étape (b4) de régularisation C^3 au cours de laquelle on traite la consigne de pilotage de manière à conférer à ladite consigne de pilotage des propriétés de dérivabilité troisième par rapport au temps et de continuité par rapport au temps, afin de générer à partir de ladite consigne de pilotage une consigne dite « consigne de pilotage filtrée » qui est de classe C^3 , puis l'on définit la consigne d'exécution à partir de ladite consigne de pilotage filtrée.

[0012] Plus préférentiellement, la sous-étape (b4) de régularisation C^3 peut consister en une sous-étape (a4) de filtrage du troisième ordre au cours de laquelle on applique à la consigne de pilotage un filtre du troisième ordre afin de générer une consigne de pilotage filtrée qui est de classe C^3 .

[0013] Par « être de classe C^3 », on indique, au sens mathématique du terme, que le paramètre considéré, ici la consigne de pilotage filtrée, ou plus précisément la fonction qui représente l'évolution dudit paramètre considéré en fonction du temps, c'est-à-dire ici la fonction représentant l'évolution de la consigne de pilotage filtrée en fonction du temps, est trois fois dérivable (différentiable) par rapport au temps, et que ladite fonction, ainsi que ses dérivées temporelles première, seconde et troisième sont continues.

[0014] Avantagusement, la régularisation C^3 de la consigne de pilotage (consigne de vitesse pour la charge suspendue), et plus particulièrement l'utilisation à cet effet d'un filtre du troisième ordre appliqué à ladite consigne de

pilotage, permet de s'assurer que la consigne de pilotage filtrée, qui sera ensuite effectivement utilisée pour définir la consigne d'exécution appliquée aux moteurs d'entraînement, est de classe C^3 .

[0015] Avantageusement, une consigne de pilotage filtrée, ainsi régularisée C^3 , présente des conditions de régularité exceptionnelles (en ce sens qu'elle est ici trois fois dérivable, et que ses dérivées temporelles première, seconde et troisième sont continues), et par conséquent des propriétés mathématiques de continuité et de bornage que ne possède généralement pas la consigne de pilotage brute, telle qu'elle est définie et modifiée en temps réel par le conducteur de l'engin.

[0016] En effet, on rappellera que le conducteur de l'engin est susceptible de faire varier la consigne de pilotage à tout instant, de manière imprévisible.

[0017] En fonction des différentes situations auxquelles ledit conducteur de l'engin doit réagir, la consigne de pilotage (qui prend ici la forme d'une consigne de vitesse pour la charge suspendue) peut donc varier d'une part en signe, lorsque le conducteur de l'engin décide de changer le sens du mouvement (gauche/droite, éloignement/rapprochement), et d'autre part en amplitude (intensité), lorsque le conducteur passe d'un mouvement qu'il souhaite rapide à un mouvement plus lent (décélération), ou inversement (accélération).

[0018] En outre, la vitesse de ces changements de consigne de pilotage peut considérablement varier, selon la fréquence et la rapidité avec laquelle le conducteur de l'engin actionne les commandes pour opérer des changements ou des corrections de trajectoire.

[0019] La consigne de pilotage brute peut donc présenter en pratique certaines variations brusques, de type échelons, assimilables mathématiquement à des discontinuités.

[0020] De même, en raison notamment de ces discontinuités, les dérivées temporelles (typiquement d'ordre un et d'ordre deux) de la consigne de pilotage, qui seront de préférence utilisées dans la modélisation du comportement de la charge suspendue et dans l'élaboration de la consigne d'exécution, pourraient présenter ponctuellement, si elles étaient calculées directement, sans régularisation (filtrage) appropriée, certaines divergences ou certaines discontinuités, si bien que la consigne d'exécution résultante serait de nature à provoquer des réactions saccadées ou instables de la charge suspendue.

[0021] C'est pourquoi le procédé selon l'invention lisse avantageusement la consigne de pilotage avant que celle-ci ne soit effectivement appliquée au(x) moteur(s) d'entraînement, ce qui permet d'éliminer du signal de commande (consigne d'exécution) les instabilités, discontinuités et autres divergences qui seraient de nature à provoquer des à-coups et l'apparition (ou l'entretien) d'un ballant.

[0022] On peut ainsi obtenir un mouvement de la charge suspendue qui est particulièrement régulier et stable, quelle que soit la nature dudit mouvement (c'est-à-dire quelle que soit la forme de la trajectoire voulue par le conducteur de l'engin), et quelles que soient la vitesse et l'amplitude dudit mouvement voulues par le conducteur de l'engin.

[0023] Avantageusement, et tel que cela sera détaillé ci-après, la régularité C^3 conférée à la consigne de pilotage permet en outre de définir ensuite la consigne d'exécution, à partir de ladite consigne de pilotage, au moyen d'un modèle mathématique simplifié qui non seulement est simple et rapide à exécuter, mais qui, surtout, produit une consigne d'exécution qui est intrinsèquement non génératrice de ballant, c'est-à-dire une consigne d'exécution qui, lorsqu'elle est appliquée aux moteurs d'actionnement, ne provoque pas (ne peut pas provoquer d'elle-même) l'apparition d'un ballant.

[0024] Par ailleurs, le procédé selon l'invention autorise notamment un réglage libre et précis des coefficients, ainsi que de la pulsation, du filtre du troisième ordre qui est appliqué à la consigne de pilotage, ce qui permet de conserver en toutes circonstances une convergence rapide de la vitesse de la charge suspendue vers la consigne de vitesse exprimée par le conducteur de l'engin.

[0025] En d'autres termes, le procédé procure un pilotage dynamique et réactif.

[0026] Ensuite, le procédé selon l'invention permet avantageusement d'optimiser l'utilisation du ou des moteurs d'entraînement, en ceci qu'il permet de tirer les meilleures performances possibles dudit ou desdits moteurs, notamment en termes de vitesse ou d'accélération conférée au point d'accroche et à la charge, tout en respectant à tout moment les limites matérielles dudit ou desdits moteurs.

[0027] On comprend en effet que si un moteur ne peut pas atteindre la consigne qui lui est fixée parce que ladite consigne est trop élevée au regard des capacités dudit moteur, alors l'entraînement réel du point d'accroche souffrira d'une insuffisance par rapport à l'entraînement souhaité, si bien que le mouvement dudit point d'accroche (et donc le mouvement de la charge suspendue) qui sera effectivement obtenu ne correspondra pas au mouvement voulu.

[0028] Or, la consigne d'exécution étant par définition calculée justement pour obtenir (théoriquement) un mouvement (mouvement voulu) régulier et sans ballant, on comprendra que si, en pratique, le moteur d'entraînement n'exécute pas correctement ladite consigne d'exécution, alors le système de pilotage ne se comportera pas comme souhaité, et qu'il pourra en résulter l'apparition d'un ballant et une certaine perte de contrôle des mouvements du point d'accroche et de la charge.

[0029] Ici, grâce à l'invention, on peut paramétrer la régularisation C^3 , et plus particulièrement on peut paramétrer le filtrage du troisième ordre, et le cas échéant faire évoluer ce paramétrage de la régularisation C^3 (respectivement du

filtrage) au fil du temps, de manière à ce que la consigne d'exécution, tout en favorisant une réponse rapide du système de pilotage, n'excède pas les capacités effectives des moteurs d'entraînement en matière de vitesse maximale et d'accélération maximale.

[0030] A ce titre, on notera notamment que d'une part l'accélération maximale que l'on peut conférer au point d'accroche (chariot) est directement dépendante de la capacité d'accélération maximale des moteurs d'entraînement qui servent à déplacer ledit point d'accroche, et que d'autre part il existe mathématiquement, du fait des lois physiques de la dynamique, une relation entre l'accélération du point d'accroche (accélération du chariot) et la dérivée troisième de la vitesse de la charge suspendue.

[0031] Par conséquent, lorsque l'on régularise C^3 la consigne de pilotage brute (consigne de vitesse de charge suspendue) exprimée par le conducteur de l'engin, conformément à l'invention, on réalise avantageusement une planification du profil de la consigne de vitesse que l'on va appliquer aux moteurs d'entraînement, c'est-à-dire que l'on planifie l'évolution dans le temps (et plus particulièrement les taux d'évolution par unité de temps) de la valeur de la consigne d'exécution (valeur de consigne de vitesse de chariot), selon un profil d'évolution qui reflète au mieux la consigne de pilotage souhaitée mais qui est également et surtout compatible avec la capacité des moteurs à fournir une réponse qui soit à chaque instant à la hauteur de ladite consigne d'exécution.

[0032] De la sorte, la consigne d'exécution est en pratique toujours "réalisable", c'est-à-dire que ladite consigne d'exécution est intrinsèquement telle que ledit système de pilotage réel est toujours capable de "réaliser" (d'atteindre) effectivement ladite consigne d'exécution qu'on lui applique, et donc de fournir une réponse réelle qui est conforme au comportement qu'on attend dudit système de pilotage, et plus particulièrement conforme au comportement que l'on attend du chariot (tel que ledit comportement attendu est défini par la consigne d'exécution).

[0033] Ainsi, la consigne d'exécution ne prend jamais le système de pilotage réel en défaut.

[0034] Plus particulièrement, le filtre du troisième ordre proposé simplifie la mise en oeuvre de saturations appropriées, lors du traitement de la consigne de pilotage, et donc la mise en oeuvre de limitations dynamiques "intelligentes" de la consigne d'exécution, qui permettent de tirer le meilleur parti des moteurs d'entraînement tout en garantissant un contrôle permanent, précis et fiable, des mouvements du point d'accroche et de la charge suspendue.

[0035] Enfin, on notera que le procédé de commande selon l'invention permet avantageusement de piloter l'engin de levage par un asservissement en boucle ouverte, simplement en appliquant la consigne d'exécution (consigne de vitesse) au moteur d'entraînement concerné, sans requérir aucune mesure du ballant effectif (c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire d'obtenir un retour d'information sur l'angle réel du ballant), ce qui limite le nombre de capteurs ainsi que la puissance de calcul nécessaires au pilotage, et par conséquent réduit la complexité, l'encombrement, et la consommation d'énergie du système de pilotage.

[0036] D'autres objets, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus en détail à la lecture de la description qui suit, ainsi qu'à l'aide des dessins annexés, fournis à titre purement illustratif et non limitatif, parmi lesquels :

La figure 1 illustre, selon une vue schématique en perspective, l'agencement général d'un exemple d'engin de levage piloté par un procédé selon l'invention.

La figure 2 illustre, selon une vue schématique de côté, le principe général d'un modèle mécanique de pendule qui sous-tend le procédé selon l'invention.

La figure 3 illustre, sous forme d'un schéma-bloc, le calcul de la pulsation applicable au filtre du troisième ordre ainsi que la saturation préliminaire de la consigne de pilotage, qui précède le filtrage du troisième ordre.

La figure 4 illustre, sous forme d'un schéma-bloc, le principe de mise en oeuvre d'une étape (b) de traitement selon l'invention, et plus particulièrement le détail d'un filtre du troisième ordre selon l'invention.

La figure 5 illustre, selon une vue schématique de dessus, la correspondance entre les systèmes de coordonnées cartésiennes et de coordonnées cylindriques permettant d'exprimer les consignes de pilotage, puis les consignes d'exécution, dans des repères appropriés.

La figure 6 illustre, sous forme d'un schéma-bloc, la mise en oeuvre du procédé selon l'invention pour commander d'une part un moteur d'orientation (l'« orientation » désignant la composante de giration en lacet, autour d'un axe (ZZ') dit « axe d'orientation ») et d'autre part un moteur de distribution (la « distribution » désignant la composante radiale d'éloignement ou de rapprochement par rapport à l'axe (ZZ') d'orientation), à partir d'une consigne de pilotage exprimée en coordonnées cylindriques, comprenant une composante radiale et une composante angulaire.

La figure 7 illustre, de façon schématique, une consigne de pilotage filtrée obtenue en réponse à une consigne de pilotage brute de type échelon, ainsi qu'une consigne d'exécution qui est déterminée à partir de ladite consigne de pilotage filtrée, tel que cela est illustré sur la figure 6, au moyen d'une formule de conversion issue du modèle mécanique de la figure 2.

[0037] La présente invention concerne un procédé de commande du déplacement d'une charge 1 suspendue à un point d'accroche H d'un engin de levage 2.

[0038] L'engin de levage 2 est conçu de manière à pouvoir déplacer le point d'accroche H, et par conséquent la charge

suspendue 1, selon une composante de rotation en lacet Θ autour d'un premier axe vertical (ZZ'), dit « axe d'orientation », et/ou selon une composante radiale $\underline{R}$, correspondant à un mouvement dit « de distribution », ici en translation le long d'un second axe (DD') dit « axe de distribution » sécant audit axe d'orientation (ZZ'), tel que cela est illustré sur les figures 1 et 2.

[0039] L'engin de levage 2 pourra notamment former une grue à tour, dont le mât 3 matérialise l'axe d'orientation (ZZ'), et dont la flèche 4 matérialise l'axe de distribution (DD'), tel que cela est illustré sur la figure 1.

[0040] Par simple commodité de description, on considérera une telle configuration de grue à tour dans ce qui suit, et plus particulièrement une configuration de grue à tour à flèche 4 horizontale, étant bien entendu qu'il est parfaitement envisageable d'appliquer le principe de l'invention à d'autres engins de levage, et notamment à des grues mobiles ou à des grues à flèche relevable.

[0041] On notera $\underline{O}$ l'intersection de l'axe de distribution (DD') et de l'axe d'orientation (ZZ').

[0042] Le point d'accroche $\underline{H}$ est de préférence formé par un chariot 5, qui pourra avantageusement être guidé en translation selon l'axe de distribution (DD'), le long de la flèche 4.

[0043] Par commodité, on pourra assimiler le chariot 5 et le point d'accroche $\underline{H}$ dans ce qui suit.

[0044] Le mouvement d'orientation Θ , et, respectivement, le mouvement de distribution $\underline{R}$, et plus particulièrement le mouvement d'entraînement du chariot 5 en translation $\underline{R}$ le long de la flèche 4, pourront être assurés par tout moteur d'entraînement 7, 8 approprié, de préférence électrique, et plus particulièrement par au moins un moteur (électrique) d'orientation 8 et, respectivement, un moteur (électrique) de distribution 7.

[0045] La charge 1 est suspendue au point d'accroche $\underline{H}$ par un dispositif de suspension 6, tel qu'un câble de suspension. Dans ce qui suit, ledit dispositif de suspension sera donc assimilé à un tel câble de suspension 6, par commodité.

[0046] La charge 1 suspendue pourra de préférence également être déplacée selon une composante verticale, dite « de levage », de sorte à pouvoir faire varier la hauteur à laquelle se trouve la charge suspendue 1 par rapport au sol.

[0047] De préférence, on pourra à cet effet faire varier la longueur $\underline{L}$ du câble de suspension 6, typiquement au moyen d'un treuil entraîné par un moteur (de préférence électrique) de levage, de manière à pouvoir modifier la distance de la charge suspendue 1 au point d'accroche $\underline{H}$, et ainsi soit faire s'élever la charge 1 par un raccourcissement de la longueur $\underline{L}$ (par enroulement du câble de suspension 6), soit au contraire faire descendre ladite charge 1 par un allongement de ladite longueur $\underline{L}$ (par déroulement du câble 6).

[0048] Par commodité, on pourra désigner par « système de pilotage » l'ensemble permettant d'assurer la mise en mouvement et le contrôle du déplacement de la charge suspendue 1, ledit ensemble comprenant typiquement le ou les modules (calculateurs) 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 permettant la mise en oeuvre du procédé selon l'invention, ainsi que le ou les moteurs d'entraînement 7, 8 (actionneurs), et le cas échéant les organes mobiles (effecteurs) de l'engin entraînés par lesdits moteurs d'entraînement 7, 8; lesdits organes mobiles correspondront ici d'une part au mât 3 et à la flèche 4, orientables en lacet selon le mouvement d'orientation Θ , et d'autre part au chariot 5 assurant le mouvement de distribution $\underline{R}$ le long de la flèche 4.

[0049] Selon l'invention, le procédé comprend une étape (a) d'acquisition de consigne de pilotage au cours de laquelle on acquiert une consigne dite « consigne de pilotage » V_u qui est représentative d'une vitesse de déplacement V_{load} que le conducteur de l'engin de levage 2 souhaite conférer à la charge suspendue 1.

[0050] Le procédé selon l'invention comprend ensuite une étape (b) de traitement au cours de laquelle on élabore, à partir de ladite consigne de pilotage V_u , ici au moyen d'un module de traitement 10, une consigne dite « consigne d'exécution » V_{trol} , qui est destinée à être appliquée à au moins un moteur d'entraînement 7, 8 afin de déplacer la charge suspendue 1, et, plus particulièrement, afin de déplacer le chariot 5 auquel est suspendu ladite charge 1.

[0051] On notera que, avantageusement, le procédé permet de réaliser un asservissement en vitesse, plutôt qu'en trajectoire, et plus particulièrement un asservissement de la vitesse du chariot 5, à partir d'une consigne de vitesse V_u qui correspond à la vitesse souhaitée pour la charge suspendue 1.

[0052] A ce titre, la consigne d'exécution V_{trol} exprimera donc de préférence la consigne de vitesse que doit atteindre le point d'accroche $\underline{H}$ (c'est-à-dire la consigne de vitesse que doit atteindre le chariot 5).

[0053] En d'autres termes, le procédé comprend de préférence une étape (a) au cours de laquelle le conducteur définit (librement) et exprime (volontairement) une consigne de pilotage sous forme d'une consigne de vitesse qu'il souhaite voir suivie par la charge suspendue 1, puis une étape (b) de traitement au cours de laquelle ladite consigne de pilotage (consigne en vitesse de charge suspendue) est traitée, ici plus particulièrement filtrée par un filtre du troisième ordre, pour être convertie en une consigne correspondante de vitesse du chariot 5, formant la consigne d'exécution (en vitesse) V_{trol} qui est appliquée au moteur d'entraînement 7,8 adéquat.

[0054] On notera du reste que le procédé offre au conducteur de l'engin une grande liberté de manoeuvre, puisque ledit conducteur peut fixer librement, à tout instant, et selon l'amplitude qu'il choisit, la consigne de pilotage (consigne de vitesse) V_u qu'il désire voir exécutée par la charge 1, et ce sans être par exemple contraint de respecter une trajectoire fixe prédéterminée.

[0055] On notera par ailleurs que le procédé selon l'invention est valable aussi bien pour le pilotage du mouvement d'orientation Θ que pour le pilotage du mouvement de distribution $\underline{R}$, ou pour le pilotage d'une combinaison simultanée

quelconque de ces deux mouvements.

[0056] Du point de vue formel, on remarquera que l'on peut avantageusement repérer la position des organes mobiles, à savoir le point d'accroche H/chariot 5 d'une part, la charge 1 suspendue d'autre part, et exprimer les mouvements desdits organes mobiles, soit dans un repère cartésien (O, X, Y, Z) associé à la base (considérée fixe) de l'engin de levage 2, soit dans un repère de type "polaire" (O, r, θ) utilisant des coordonnées cylindriques, voire sphériques.

[0057] Par convention, on pourra ainsi noter, dans ledit repère cartésien :

P_{trol}^x et P_{trol}^y les positions en X (premier axe horizontal), respectivement en Y (second axe horizontal, perpendiculaire au premier axe horizontal X), du chariot 5 (l'indice « trol » désignant le chariot ou « trolley ») ;

V_{trol}^x et V_{trol}^y les composantes de vitesse en X, respectivement en Y, dudit chariot 5 ;

P_{load}^x et P_{load}^y les positions en X, respectivement en Y, de la charge 1 suspendue (l'indice « load » désignant la charge suspendue 1) ;

V_{load}^x et V_{load}^y les composantes de vitesse en X, respectivement en Y, de ladite charge suspendue 1, qui correspondent aux composantes de la vitesse (voulue) de la charge suspendue 1, et donc, en pratique, aux composantes de la consigne de pilotage V_u .

[0058] Lorsque l'on utilisera les coordonnées cylindriques (r, θ), on pourra plus particulièrement attacher à chaque organe mobile considéré un repère de Frénet permettant d'exprimer la composante radiale V^r (selon le mouvement de distribution R) et la composante orthoradiale V^θ (selon la tangente au mouvement d'orientation Θ) de la vitesse de l'organe mobile considéré, tel que cela est notamment illustré sur la figure 5.

[0059] Ainsi, sur ladite figure 5, de même que sur la figure 6, V_{load}^r et V_{load}^θ représentent les composantes radiale et respectivement orthoradiale du vecteur vitesse V_{load} de la charge 1 suspendue (c'est-à-dire en pratique les composantes radiale et orthoradiale de la consigne de pilotage en vitesse V_u), tandis que V_{trol}^r et V_{trol}^θ représentent les composantes radiale et respectivement orthoradiale du vecteur vitesse V_{trol} du chariot 5 (c'est-à-dire les composantes radiale et orthoradiale de la consigne d'exécution en vitesse V_{trol} , qui sont appliquées respectivement au moteur de distribution 7 et au moteur d'orientation 8).

[0060] Tel que cela est illustré sur les figures 3, 4 et 6, la consigne de pilotage V_u peut être fournie par le conducteur de l'engin au moyen de tout organe de commande 11 approprié.

[0061] Ledit organe de commande 11 pourra notamment prendre la forme d'un joystick, ou bien d'un ensemble de manettes, qui permettra au conducteur d'exprimer la consigne de vitesse d'orientation (vitesse de lacet, orthoradiale) V_{load}^θ et la consigne de vitesse de distribution (vitesse radiale) V_{load}^r qu'il souhaite imprimer à la charge suspendue 1.

[0062] Par simple commodité de notation, la consigne de pilotage V_u brute, telle qu'elle est exprimée par le conducteur de l'engin au niveau de l'organe de commande 11, c'est-à-dire le signal fourni par le joystick en entrée du système de pilotage, sera de préférence référencée V_{JOY} sur les figures susmentionnées.

[0063] Afin de mieux expliquer l'invention, quelques éléments de mécanique théorique permettant de modéliser un système pendulaire vont maintenant être exposés, en référence à la figure 2.

[0064] On notera que l'explication donnée ici dans un plan, en référence à une seule dimension de déplacement, selon l'axe X, que l'on considère parallèle à la flèche 4 et à l'axe de distribution (DD'), reste valable en trois dimensions.

[0065] D'après le principe fondamental de la dynamique (loi de Newton), et en négligeant d'éventuels efforts externes tels que le vent, on a :

$$M\vec{a}_{\text{load}} = \vec{T} + M\vec{g}$$

où

M représente la masse de la charge suspendue 1 ;

$\vec{a}_{\text{load}}$ représente l'accélération de la charge suspendue 1 (que l'on considère ici portée par la direction horizontale X) ;

$\vec{T}$ représente la tension du câble de suspension 6 ;

$\vec{g}$ représente la gravité (accélération de pesanteur).

[0066] L'équation ci-dessus implique que le vecteur $M\vec{a}_{\text{load}} - M\vec{g}$ est colinéaire (parallèle) au vecteur $\vec{T}$. De

$$\tan \beta = \frac{Ma_{\text{load}}}{Mg} = \frac{a_{\text{load}}}{g}$$

ce fait, on a :

avec β l'angle (angle de ballant) que forme le câble de suspension 6 avec la verticale Z.

[0067] En faisant l'hypothèse des petits angles, on peut également écrire :

$$\sin \beta \approx \tan \beta = \frac{P_{trol} - P_{load}}{L}$$

avec

P_{trol} la position (ici en X) du chariot 5,
 P_{load} la position (ici en X) de la charge 1, et
 L la longueur du câble de suspension 6.

[0068] On en déduit la relation suivante entre la position P_{trol} du chariot d'une part, et la position P_{load} de la charge suspendue et la vitesse V_{load} de la charge d'autre part :

$$P_{trol} = P_{load} + \frac{L}{g} a_{load} = P_{load} + \frac{L}{g} \frac{d}{dt} V_{load}$$

et, en dérivant l'expression ci-dessus par rapport au temps, on obtient une équation différentielle du second degré, dite « formule de conversion », qui exprime la vitesse V_{trol} du chariot 5 en fonction de la vitesse V_{load} de la charge suspendue 1 :

$$V_{trol} = V_{load} + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}$$

ce qui peut également s'exprimer par la transformée de Laplace :

$$V_{trol}(p) = \left(1 + \frac{L}{g} p^2\right) V_{load}$$

[0069] En pratique, grâce à la formule de conversion ci-dessus, on peut donc calculer la consigne de vitesse du chariot V_{trol} , c'est-à-dire concrètement la consigne d'exécution V_{trol} , à partir de la valeur de la vitesse V_{load} que l'on souhaite conférer à la charge suspendue, c'est-à-dire à partir de la consigne de pilotage V_u .

[0070] Toutefois, il est également nécessaire de prendre en considération le fait que, dans le système de pilotage réel, le chariot 5 a nécessairement une accélération finie (bornée). Cette condition matérielle impose que, d'un point de

$$\dot{V}_{trol} = \frac{d}{dt} V_{trol}$$

vue mathématique, l'accélération du chariot, c'est-à-dire la dérivée temporelle de la vitesse du chariot, doit d'une part exister, et d'autre part être bornée (c'est-à-dire être majorée par une valeur fixe finie).

[0071] Or, le calcul de la vitesse du chariot (consigne d'exécution) V_{trol} selon la formule de conversion ci-dessus fait

$$\ddot{V}_{load} = \frac{d^2}{dt^2} V_{load}$$

intervenir la dérivée temporelle seconde de la vitesse de la charge suspendue (vitesse de pilotage) V_{load} .

[0072] Au regard de cette formule de conversion, l'accélération du chariot $\dot{V}_{trol} = \frac{d}{dt} V_{trol}$ peut donc s'exprimer

$$\ddot{V}_{load} = \frac{d}{dt} \ddot{V}_{load} = \frac{d^3}{dt^3} V_{load}$$

sous forme d'une fonction de la dérivée temporelle troisième de la vitesse de la charge V_{load} .

[0073] Il s'ensuit que la condition d'existence et de bornage de l'accélération du chariot $\dot{V}_{trol}$ impose que la dérivée temporelle troisième $\ddot{V}_{load}$ de la vitesse de la charge V_{load} existe et soit bornée, c'est-à-dire que la vitesse de la charge suspendue V_{load} (et par conséquent la consigne de pilotage V_u qui va servir à fixer ladite vitesse de la charge suspendue) soit trois fois dérivable, et que sa dérivée troisième soit continue (et bornée).

[0074] En d'autres termes, on doit s'assurer que la consigne de pilotage V_u effectivement utilisée pour calculer (selon la formule de conversion ci-dessus) la consigne d'exécution V_{trol} est (à tout moment, et en toutes circonstances) de classe C^3 , et ce alors même que ladite consigne de pilotage V_u est initialement exprimée par le conducteur de l'engin, et acquise sensiblement en temps réel, sous une forme brute V_{JOY} qui est susceptible de varier de façon imprévisible au fil du temps, au libre choix du conducteur, et qui ne possède donc pas nécessairement ces propriétés de régularité C^3 .

[0075] C'est notamment pourquoi, selon l'invention, l'étape (b) de traitement comporte avantageusement une sous-étape (b4) de régularisation C^3 au cours de laquelle on traite la consigne de pilotage V_u de manière à conférer à ladite consigne de pilotage V_u des propriétés de dérivabilité troisième par rapport au temps et de continuité par rapport au temps, afin de générer, à partir de ladite consigne de pilotage V_u , une consigne de pilotage filtrée V_f qui est de classe C^3 , puis l'on définit la consigne d'exécution V_{trol} à partir de ladite consigne de pilotage filtrée V_f .

[0076] Selon une variante possible de mise en oeuvre, la régularisation C^3 peut être réalisée en utilisant des polynômes d'interpolation.

[0077] Selon cette variante, on interpole la consigne de pilotage V_u , et plus particulièrement plusieurs voire la totalité des valeurs considérées parmi la succession des différentes valeurs prises par la consigne de pilotage V_u au cours d'un intervalle de temps donné, au moyen d'un polynôme.

[0078] Ledit polynôme possède intrinsèquement une classe de régularité (au moins) C^3 , et fournit donc une approximation à la fois précise et de classe C^3 de la consigne de pilotage, sous forme d'une consigne de pilotage filtrée V_f de type polynomial.

[0079] Un tel polynôme procure donc une planification de classe C^3 de la consigne de pilotage.

[0080] Toutefois, selon une autre variante particulièrement préférentielle et plus simple à mettre en oeuvre que la variante par interpolation polynomiale, lors de la sous-étape (b4) de régularisation C^3 , on applique à la consigne de pilotage V_u , pour régulariser C^3 ladite consigne de pilotage, un filtre du troisième ordre F3 afin de générer la consigne de pilotage filtrée V_f qui est de classe C^3 .

[0081] En d'autres termes, la sous-étape (b4) constitue de préférence une sous-étape de filtrage du troisième ordre au cours de laquelle on applique à la consigne de pilotage V_u un filtre du troisième ordre F3 afin de générer une consigne de pilotage filtrée V_f qui est trois fois dérivable (et plus exactement de classe de régularité C^3).

[0082] De préférence, la régularisation C^3 , et plus particulièrement le filtrage du troisième ordre, s'effectue au moyen d'un module de filtrage du troisième ordre 12, formé par un calculateur, électronique ou informatique.

[0083] Le filtrage du troisième ordre F3 peut s'écrire sous forme d'une fonction de transfert :

$$V_f(p) = F3 \cdot V_u(p) = \frac{1}{\frac{p^3}{\omega^3} + c_2 \frac{p^2}{\omega^2} + c_1 \frac{p}{\omega} + 1} V_u(p)$$

avec :

ω la pulsation du filtre du troisième ordre F3 ;

c_1, c_2 les coefficients, respectivement du premier ordre et du second ordre, utilisés par ledit filtre du troisième ordre F3.

[0084] Dans le domaine temporel, le filtre du troisième ordre F3 se traduit par l'équation différentielle suivante :

$$V_f + \frac{c_1}{\omega} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega^2} \ddot{V}_f + \frac{1}{\omega^3} \ddot{\ddot{V}}_f = V_u$$

[0085] Afin d'optimiser le filtre du troisième ordre F3, on choisira de préférence : $c_1 = 2,15$ et $c_2 = 1,75$, tel que cela apparaît sur la figure 4.

[0086] Ces valeurs permettent en effet d'optimiser la réactivité du filtre F3, en minimisant son temps réponse à 5% (c'est-à-dire le temps nécessaire pour faire converger la réponse vers une consigne de type échelon avec une erreur inférieure à 5% de la valeur dudit échelon), tout en limitant le dépassement (« overshoot »).

[0087] On notera que, selon une variante possible de mise en oeuvre de l'invention, on pourrait utiliser directement la consigne de pilotage filtrée V_f en tant que consigne d'exécution V_{trol} appliquée aux moteurs d'entraînement 7, 8, c'est-à-dire que l'on pourrait poser : $V_{\text{trol}} = V_f$.

[0088] En effet, grâce à la régularisation C^3 , obtenue ici par le filtrage du troisième ordre, la consigne de pilotage filtrée V_f est intrinsèquement définie, et plus globalement « planifiée », de sorte à converger progressivement vers la consigne de pilotage V_u , sans jamais être « trop raide ».

[0089] De la sorte, ladite consigne de pilotage filtrée V_f , régularisée C^3 , est effectivement réalisable, les moteurs d'en-

entraînement 7, 8 étant capables de suivre ladite consigne de pilotage filtrée V_f .

[0090] Ainsi, dans l'exemple illustré sur la figure 7, où le conducteur de l'engin applique une consigne de pilotage V_u de type échelon, on constate que la consigne de pilotage filtrée V_f évolue effectivement selon une pente plus progressive que celle dudit échelon, et sans discontinuité.

[0091] Toutefois, selon une autre variante particulièrement préférentielle de mise en oeuvre de l'invention, après avoir déterminé la consigne de pilotage filtrée V_f , la consigne d'exécution peut ensuite être définie (et calculée) comme suit, en appliquant la formule de conversion mentionnée plus haut :

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

avec :

V_f la consigne de pilotage filtrée (régularisée C^3), ici plus préférentiellement issue du filtre du troisième ordre F3, L la longueur du câble de suspension 6 qui relie la charge suspendue au point d'accroche, g la gravité.

[0092] Cette formule de conversion, simple et rapide à exécuter, présente l'avantage d'être intrinsèquement une fonction anti-ballant.

[0093] Ainsi, utiliser la formule de conversion ci-dessus est avantageusement équivalent à appliquer à la consigne de pilotage filtrée V_f une fonction (supplémentaire) anti-ballant, qui permet de produire une consigne d'exécution V_{trol} non génératrice de ballant.

[0094] En effet, la formule de conversion ci-dessus provient d'un modèle de pendule simplifié, dans lequel on considère que l'angle de ballant β est quasi-nul, c'est-à-dire que la charge suspendue 1 ne se balance pas (ou quasiment pas) par rapport au chariot 5.

[0095] Avantageusement, cela signifie, de manière réciproque, qu'une consigne d'exécution V_{trol} élaborée à partir de ce modèle est telle que, si ladite consigne d'exécution est effectivement exécutée fidèlement par les moteurs d'entraînement 7, 8, et donc par le chariot 5, ladite consigne d'exécution V_{trol} ne peut pas, en elle-même, provoquer de ballant.

[0096] La figure 7 montre une consigne d'exécution V_{trol} ainsi obtenue en appliquant la formule de conversion à une consigne de pilotage filtrée V_f issue d'une consigne de pilotage V_u de type échelon.

[0097] La conversion de la consigne filtrée V_f en consigne d'exécution V_{trol} pourra être opérée par tout module de conversion (calculateur) 13 approprié, du genre circuit électronique ou module programmé informatiquement.

[0098] On remarquera par ailleurs que la détermination de la consigne d'exécution V_{trol} selon l'invention peut avantageusement être réalisée sans qu'il soit nécessaire de connaître, et *a fortiori* sans qu'il soit nécessaire de mesurer, la masse M de la charge suspendue 1, dans la mesure où ce paramètre (la masse M de la charge 1) n'intervient pas dans les formules employées pendant l'étape (b) de traitement, et notamment n'intervient pas dans la définition du filtre du troisième ordre F3 ou dans la formule de conversion susmentionnée.

[0099] On peut donc faire l'économie d'une mesure de la masse M de la charge suspendue 1 ou d'un traitement de ce paramètre de masse M , ce qui permet, ici encore, de simplifier la structure de l'engin de levage 2, et de simplifier et d'accélérer l'exécution du procédé.

[0100] Avantageusement, les effets anti-ballant intrinsèquement procurés d'une part par la régularisation C^3 elle-même, et d'autre part par l'utilisation d'une formule de conversion non génératrice de ballant, se combineront pour offrir un asservissement optimisé du mouvement de la charge suspendue 1, totalement dépourvu de ballant.

[0101] Compte tenu des aptitudes du procédé à générer une consigne d'exécution qui ne provoque pas de ballant, on pourra, de façon particulièrement préférentielle, mettre en oeuvre l'asservissement selon l'invention en boucle ouverte.

[0102] Ainsi, on pourra notamment piloter l'engin de levage 2, et plus particulièrement les déplacements du chariot 5 (ici typiquement en orientation Θ et en distribution R), en appliquant "en aveugle" la consigne d'exécution (ici de préférence une consigne de vitesse) V_{trol} au(x) moteur(s) d'entraînement 7, 8, sans prévoir d'asservissement qui viserait à réduire ensuite le ballant réel qui résulterait éventuellement de l'application de cette consigne d'exécution ou bien encore qui résulterait de perturbations extérieures.

[0103] En particulier, on pourra ainsi piloter l'engin de levage 2 sans avoir à utiliser de retour (« feedback ») mesuré ou calculé de l'angle de ballant effectif (réel) de la charge suspendue 1, ni de retour mesuré ou calculé de la vitesse angulaire du ballant effectif de ladite charge suspendue 1 et, de préférence, sans avoir à utiliser de retour mesuré de la vitesse effective (réelle) du déplacement du point d'accroche H .

[0104] En utilisant en boucle ouverte le procédé selon l'invention, on peut donc avantageusement obtenir un excellent contrôle du déplacement de la charge suspendue 1, et plus particulièrement offrir au conducteur de l'engin d'excellentes possibilités de contrôle manuel du déplacement de la charge suspendue, au moyen d'un procédé qui allie simplicité et

rapidité d'exécution, tout en simplifiant la structure de l'engin de levage 2, et notamment en faisant l'économie de capteurs destinés à mesurer le ballant.

[0105] Ceci étant, le procédé selon l'invention reste toutefois parfaitement compatible, en variante de réalisation, avec un asservissement en boucle fermée, selon lequel on détermine tout d'abord la consigne d'exécution V_{trol} conformément à l'invention, en faisant notamment intervenir le filtrage du troisième ordre, puis on applique ensuite ladite consigne d'exécution V_{trol} aux moteurs d'entraînement 7, 8 tout en prévoyant un asservissement en boucle fermée (tel que décrit plus haut) destiné à réduire activement un éventuel ballant, au cas où un tel ballant apparaîtrait malgré tout, en étant provoqué par des perturbations externes au système de pilotage, telles que des rafales de vent, par exemple.

[0106] Avantagusement, selon une pareille variante de réalisation, la détermination de la consigne d'exécution V_{trol} selon l'invention, avec régularisation C^3 d'une part et utilisation de la formule de conversion anti-ballant mentionnée plus haut d'autre part, permettra toutefois de générer une consigne d'exécution (consigne de vitesse de chariot) V_{trol} déjà optimisée, non génératrice de ballant (intrinsèquement), si bien que la tâche de compensation de ballant affectée à la boucle fermée de l'asservissement sera grandement simplifiée (puisque'il s'agira seulement de réduire d'éventuels ballants provoqués par les seules perturbations externes au système de pilotage).

[0107] On rappellera par ailleurs que les moteurs d'entraînement 7, 8 présentent, par nature, des capacités de vitesse, d'accélération, et de couple limitées (finies).

[0108] Par conséquent, il est nécessaire que la consigne d'exécution V_{trol} soit compatible avec ces capacités, afin que les moteurs 7, 8 puissent effectivement exécuter ladite consigne d'exécution V_{trol} , et ainsi générer, comme résultat de l'application de ladite consigne d'exécution V_{trol} auxdits moteurs 7, 8, des mouvements du chariot 5 et de la charge suspendue 1 sans ballant, qui soient conformes aux mouvements qui sont attendus au regard de ladite consigne d'exécution.

[0109] En d'autres termes, il est nécessaire de veiller à générer une consigne d'exécution V_{trol} qui soit réalisable, c'est-à-dire cohérente et compatible avec les capacités matérielles effectives des moteurs d'entraînement 7, 8, de manière à ne pas chercher à solliciter le système de pilotage au-delà de ses capacités, et ainsi de manière à éviter toute situation dans laquelle une insuffisance d'un moteur 7, 8 conduirait le mouvement réel à différer du mouvement idéal attendu, et provoquerait par exemple l'apparition ou l'accentuation d'un ballant.

[0110] En définitive, au regard des critères de stabilité, de rapidité de convergence, et de respect des capacités matérielles des moteurs d'entraînement 7, 8, on peut considérer que, globalement, la consigne de pilotage filtrée (consigne de vitesse filtrée) V_f doit répondre (simultanément) à quatre contraintes cumulées :

- Contrainte n°1 : la consigne de vitesse filtrée $V_f(t)$ doit être trois fois dérivable, et plus particulièrement de classe C^3 ;
- Contrainte n°2 : la consigne de vitesse filtrée V_f doit converger le plus rapidement possible vers la consigne de pilotage V_u (en réponse typiquement à une consigne de pilotage V_u formant un échelon constant) ;
- Contrainte n°3 : l'accélération du chariot 5 ne doit jamais dépasser la capacité d'accélération intrinsèque maximale du moteur d'entraînement 7, 8 correspondant, c'est-à-dire que l'on a en permanence : $|\dot{V}_{\text{trol}}| \leq a_{\text{MAX}}$, soit

$$|\dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f| \leq a_{\text{MAX}}$$

où a_{MAX} est une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche $\underline{H}$ auquel est suspendue la charge 1 (c'est-à-dire ici au chariot 5) ;

- Contrainte n°4 : la consigne de vitesse du chariot (consigne d'exécution) V_{trol} ne doit jamais dépasser la vitesse maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au chariot 5, c'est-à-dire que l'on a en permanence : $|V_{\text{trol}}|$

$$|V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f| \leq$$

$\leq V_{\text{MAX}}$ soit : V_{MAX} où V_{MAX} est une valeur représentative de la vitesse maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche $\underline{H}$ auquel est suspendue la charge 1 (c'est-à-dire ici au chariot 5).

[0111] La régularisation C^3 , et plus particulièrement l'application du filtre du troisième ordre $F3$, permet de satisfaire à la contrainte n°1 (consigne trois fois dérivable, et plus particulièrement de classe C^3).

[0112] On peut satisfaire à la contrainte n°2 (convergence rapide) en choisissant convenablement les coefficients c_1 , c_2 dudit filtre du troisième ordre $F3$, comme indiqué ci-dessus, et d'autre part en adaptant la pulsation ω dudit filtre du troisième ordre $F3$ selon les circonstances, tel que cela sera détaillé ci-après.

[0113] On peut enfin satisfaire aux contraintes n°3 (limite d'accélération) et n°4 (limite de vitesse), c'est-à-dire s'assurer que la consigne d'exécution (consigne de vitesse du chariot) V_{trol} est réalisable, en appliquant des fonctions de saturation $SAT1$, $SAT2$, $SAT3$ appropriées, qui seront détaillées dans ce qui suit.

[0114] Ainsi, selon une caractéristique préférentielle qui peut constituer une invention à part entière, lors de la sous-étape (b4) de régularisation C^3 , on pourra faire intervenir, pour générer la consigne de pilotage filtrée V_f , un paramètre

qui est représentatif de l'accélération maximale a_{MAX} que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1, afin que la consigne d'exécution V_{trol} qui découle de ladite consigne de pilotage filtrée V_f dépende de ladite accélération maximale de manière à être réalisable par ledit moteur d'entraînement 7, 8.

[0115] Plus particulièrement, ledit paramètre choisi comme représentatif de l'accélération maximale a_{MAX} admissible par le moteur d'entraînement 7, 8 pourra être la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3, sous forme d'une pulsation dite « pulsation calculée » ω_0 qui sera déterminée en fonction notamment de ladite valeur d'accélération maximale admissible a_{MAX} .

[0116] Les inventeurs ont en effet établi qu'il existait un lien entre pulsation et accélération maximale admissible.

$$\dot{V}_{trol} = \dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f.$$

[0117] En effet, on a vu que l'accélération du chariot vaut

[0118] Supposons que l'on applique à l'instant $t = 0$ (instant initial), à une charge suspendue 1 au repos, c'est-à-dire à un système initialement à l'équilibre, une consigne V_u de type échelon.

[0119] Le système étant initialement à l'équilibre, on peut alors considérer que l'accélération de la charge suspendue 1 est initialement nulle, c'est-à-dire que l'on a, à l'instant $t=0$: $\dot{V}_f(0) \approx 0$, du fait de l'inertie, tandis que l'accélération $\dot{V}_{trol}$

$$\frac{L}{g} \ddot{V}_f(0) = \frac{L}{g} \omega^3 V_u.$$

du chariot 5 est maximale à ce même instant $t=0$, et vaut alors g

$$\frac{L}{g} \omega^3 V_u \leq a_{MAX}$$

[0120] La contrainte n°3 (limite d'accélération) impose donc :

$$\omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_u \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

c'est-à-dire :

[0121] Par conséquent, l'étape (b) de traitement peut donc comprendre de préférence une sous-étape (b1) de réglage de la pulsation du filtre du troisième ordre F3, au cours de laquelle on calcule la pulsation ω , ω_0 dudit filtre du troisième ordre F3 à partir d'une valeur a_{MAX} qui est représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1.

[0122] Par ailleurs, et dans la mesure où l'équation ci-dessus fait également apparaître, en conséquence de la contrainte n°3 (limite d'accélération), un lien entre la pulsation ω et la consigne de vitesse V_u , l'étape (b) de traitement comprendra de préférence une sous-étape (b1) de réglage de la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3, au cours de laquelle on adapte la pulsation ω du filtre du troisième ordre, et plus particulièrement la pulsation calculée ω_0 , en fonction de la valeur de la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} appliquée par le conducteur de l'engin de levage à l'instant t considéré.

[0123] Plus préférentiellement, on modifie la valeur de la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3 selon que la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} est inférieure ou au contraire supérieure à une vitesse de référence V_{thresh} qui est définie à partir de la valeur de vitesse maximale V_{MAX} que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1.

[0124] En pratique, on fera varier la pulsation ω de sorte à augmenter ladite pulsation ω et ainsi utiliser une pulsation considérée comme grande, dite « valeur haute » ω_{high} , et donc un filtre F3 plus réactif, lorsque la valeur absolue de la consigne de pilotage (c'est-à-dire l'amplitude de la consigne de vitesse) V_u , V_{JOY} est faible au regard de la vitesse maximale admissible V_{MAX} , et en diminuant au contraire ladite pulsation ω au profit d'une pulsation plus faible, dite « valeur basse » ω_{low} , lorsque la valeur absolue de la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} augmentera pour se rapprocher de la vitesse maximale admissible V_{MAX} .

[0125] En particulier, lorsque la consigne de vitesse correspond à la vitesse maximale admissible : $V_u = V_{MAX}$, la

$$\omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

contrainte n°3 (limite d'accélération) imposera en effet :

[0126] En pratique, compte-tenu de ce qui précède, et tel que cela est illustré sur la figure 3, on pourra donc par exemple calculer la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3, lors de la sous-étape (b1) de réglage de la pulsation du filtre du troisième ordre, à partir d'une pulsation calculée ω_0 déterminé

on choisit $V_{thresh} = k \cdot V_{MAX}$, avec $0 < k < 1$, par exemple $k = 0,5$;
si $V_u \leq V_{thresh}$, alors on définit la pulsation calculée ω_0 comme
formant ici une valeur haute ;

$$\omega_0 = \omega_{high} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{thresh} \times L} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$\omega_0 = \omega_{low} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}},$$

si $V_u > V_{thresh}$, alors on définit la pulsation calculée ω_0 comme

ici une valeur basse, car $V_{MAX} > V_{thresh}$, si bien que $\omega_{low} < \omega_{high}$; avec :

V_u la consigne de pilotage (ici égale à la consigne de pilotage brute V_{JOY}),

k un facteur de réglage choisi, compris entre 0 et 1,

L la longueur du câble de suspension 6 qui relie la charge suspendue 1 au point d'accroche H ,

g la gravité (accélération de pesanteur),

V_{MAX} une valeur arbitraire (de réglage) que l'on considère comme représentative de la vitesse maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1 ; en pratique V_{MAX} sera arbitrairement choisie en fonction des caractéristiques de l'engin de levage 2, de la charge 1 prévue, et du moteur d'entraînement 7, 8 concerné, et pourra par exemple être égale à la valeur de vitesse maximale effective que le moteur d'entraînement 7, 8 est effectivement capable, d'après des essais, de conférer au chariot 5, ou bien, de préférence, être égale à une fraction (strictement inférieure à 100%, mais non nulle) de cette valeur de vitesse maximale effective ;

a_{MAX} une valeur arbitraire (de réglage) que l'on considère comme représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1 ; a_{MAX} pourra par exemple être égale à la valeur maximale effective d'accélération du moteur, déterminée par des essais, ou bien, de préférence, être égale à une fraction (strictement inférieure à 100%, mais non nulle) de cette valeur maximale effective d'accélération.

[0127] Le double objectif de cette adaptation (en temps réel) de la pulsation ω est d'optimiser la réactivité du filtre du troisième ordre 3 (contrainte n°2) en augmentant ladite pulsation ω lorsque cela est possible, car le temps de réponse du filtre F3 est inversement proportionnel à ladite pulsation ω (avec les coefficients c_1 , c_2 choisis comme indiqué plus haut, le temps de réponse à 5% est de l'ordre de $4/\omega$), tout en respectant la contrainte n°3 liée au non-dépassement de la capacité maximale d'accélération du moteur d'entraînement 7, 8, qui fixe une limite supérieure admissible pour ladite pulsation ω .

[0128] On notera du reste que quelle que soit la loi retenue pour déterminer la pulsation ω , l'utilisation d'une pulsation ajustable permet de régler dynamiquement le filtre du troisième ordre F3, et d'intégrer directement et intrinsèquement au sein dudit filtre F3, de façon particulièrement simple, une partie des contraintes liées notamment aux capacités matérielles de vitesse et d'accélération des moteurs d'entraînement 7, 8.

[0129] L'ajustement de la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3 pourra être réalisé par tout module d'ajustement de pulsation 14 approprié, formant un calculateur comprenant par exemple un circuit électronique ou un programme informatique adapté.

[0130] Par ailleurs, les inventeurs ont constaté empiriquement que, pour éviter de déstabiliser le filtre du troisième ordre F3, notamment lors des transitions entre la valeur haute ω_{high} et la valeur basse ω_{low} , la pulsation (calculée) ω , ω_0 devait être deux fois dérivable (par rapport au temps).

[0131] A ce titre, les inventeurs ont constaté qu'il était souhaitable de lisser la pulsation (calculée) ω , ω_0 , afin en particulier de garantir que ses évolutions dans le temps, et en particulier les transitions valeur haute ω_{high} /valeur basse ω_{low} susmentionnées, soient continues et deux fois dérivables.

[0132] C'est pourquoi, selon une caractéristique préférentielle qui peut constituer une invention à part entière, lors de la sous-étape (b1) de réglage de la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3, on applique lors de la détermination de la pulsation ω , et plus particulièrement on applique à la pulsation calculée ω_0 , un filtre du second ordre F2, de manière à ce que le filtre du troisième ordre F3 utilise comme pulsation ω une pulsation calculée filtrée ω_F .

[0133] Ladite pulsation calculée filtrée ω_F est ainsi préférentiellement définie comme :

$$\omega_F(p) = \frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_X} + \frac{p^2}{\omega_X^2}} \omega_0(p)$$

avec :

ω_0 la pulsation calculée (dite aussi « pulsation-cible »), obtenue comme indiqué plus haut, avant filtrage du second ordre F2,

ω_x la pulsation propre du filtre du second ordre F2, par exemple égale à 4 rad/s,

m le coefficient d'amortissement du filtre du second ordre F2, de préférence égal à 0,7 (ce choix de valeur permettant d'obtenir un bon compromis entre temps de réponse faible et dépassement limité du filtre du second ordre).

[0134] Par ailleurs, on constatera que si la pulsation ω du filtre du troisième ordre F3, et plus particulièrement la pulsation filtrée $\omega = \omega_F$ dudit filtre du troisième ordre F3, calculée comme décrit ci-dessus, varie continûment (c'est-à-dire régulièrement, sans discontinuité au sens mathématique du terme) pour converger vers la pulsation-cible calculée ω_0 , et plus particulièrement varie pour passer continûment de la valeur haute ω_{high} à la valeur basse ω_{low} ou inversement,

alors, dans l'absolu, pourraient se présenter certaines situations dans lesquelles l'inégalité $\frac{L}{g} \omega^3 V_u \leq a_{MAX}$,

$$\omega \leq \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_u \times L} \right)^{\frac{1}{3}},$$

c'est-à-dire qui résulte de la contrainte n°3 (capacité limitée d'accélération) pourrait temporairement être violée.

[0135] En effet, supposons par exemple que l'on se trouve initialement dans une situation dans laquelle le conducteur de l'engin sollicite peu ou pas le déplacement de la charge suspendue 1, de telle sorte que la consigne de pilotage (en vitesse) V_u est faible, voire nulle, si bien qu'elle est inférieure à la vitesse de référence : $V_u < V_{thresh}$, par exemple avec $V_u = 0$ m/s.

[0136] La pulsation ω , ω_F du filtre du troisième ordre F3 est alors proche de, voire égale à, sa valeur haute ω_{high} .

[0137] Supposons maintenant que le conducteur de l'engin applique soudainement une consigne de vitesse V_u de forte amplitude, supérieure à la vitesse de référence V_{thresh} , et par exemple voisine de la vitesse maximale admissible : $V_u = V_{MAX}$. En pratique, cela revient à appliquer au système de pilotage un échelon selon lequel le conducteur fait passer quasi-instantanément la consigne de pilotage V_u de sa valeur initiale faible, voire nulle (typiquement 0 m/s) à une valeur haute, typiquement V_{MAX} .

[0138] Comme la consigne $V_u = V_{MAX}$ dépasse désormais la vitesse de référence V_{thresh} , le réglage automatique de la pulsation du filtre du troisième ordre, selon la sous-étape (b1), redéfinit la valeur de pulsation cible ω_0 , et en l'occurrence l'abaisse pour la fixer à la valeur basse : $\omega_0 = \omega_{low}$.

[0139] Cependant, en raison du filtrage du second ordre F2 qui est appliqué pour obtenir la pulsation filtrée ω_F , telle qu'elle est effectivement utilisée par le filtre du troisième ordre F3, la transition de ladite pulsation filtrée ω_F depuis sa valeur haute ω_{high} initiale jusqu'à sa (nouvelle) valeur-cible basse $\omega_0 = \omega_{low}$ n'est pas instantanée, mais au contraire relativement progressive, en ceci que ladite transition (en l'espèce, la diminution) de la pulsation, c'est-à-dire la convergence de la pulsation filtrée ω_F vers la valeur basse ω_{low} , peut s'opérer plus lentement que le changement (ici l'augmentation) de la consigne de pilotage V_u , c'est-à-dire plus lentement que la convergence de la consigne de pilotage V_u vers sa valeur haute V_{MAX} .

[0140] On comprendra donc que, pendant la brève durée qui est nécessaire pour adapter la pulsation ω , ω_F du filtre du troisième ordre F3 à la nouvelle consigne de pilotage V_u , on peut donc temporairement se trouver dans une situation où coexistent une consigne de pilotage proche de sa valeur haute (V_u étant sensiblement égale à V_{MAX}) et une pulsation ω , ω_F également proche de sa valeur haute ω_{high} , du fait que ladite pulsation "tarde" à diminuer pour atteindre sa valeur basse ω_{low} .

[0141] En pareil cas, l'accélération demandée au chariot 5 serait alors provisoirement sensiblement égale à

$\frac{L}{g} \omega_{high}^3 V_{MAX}$, et pourrait ainsi temporairement excéder la capacité maximale d'accélération $a_{MAX} = \frac{L}{g} \omega_{low}^3 V_{MAX}$ du moteur 7, 8, puisque $\omega_{high} > \omega_{low}$.

[0142] C'est notamment pourquoi, afin d'éviter une telle situation, et plus particulièrement afin de garantir que l'on

$$|V_u| \leq \frac{g}{L \omega^3} a_{MAX},$$

satisfait en permanence à l'inégalité (posée par la contrainte n°3) : l'étape (b) de traitement comprend de préférence, selon une caractéristique qui peut constituer une invention à part entière, une sous-étape (b2) de saturation préliminaire, au cours de laquelle on applique à la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} une première loi de saturation SAT1 qui est calculée en fonction de la pulsation ω , ω_F du filtre du troisième ordre F3 (c'est-à-dire en fonction de la valeur instantanée prise par la pulsation ω , ω_F du filtre du troisième ordre à l'instant considéré).

[0143] Tel que cela est notamment illustré sur les figures 3 et 4, cette première loi de saturation SAT1 pourra être mise en oeuvre par un premier module de saturation 15 approprié, formant un calculateur comprenant par exemple un circuit électronique ou un programme informatique adapté.

[0144] De préférence, la première loi de saturation SAT1 s'exprimera par :

$$SAT1(V_u) = V_u \text{ si } -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \leq V_u \leq \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u < -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = +\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u > \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

avec

V_u la consigne de pilotage (ici égale à la consigne de pilotage brute V_{JOY}),

ω_F la pulsation (et plus particulièrement la pulsation filtrée) du filtre du troisième ordre F3,

L la longueur du câble de suspension 6,

g la gravité et

a_{MAX} une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1 (ladite valeur d'accélération maximale étant de préférence définie comme indiqué plus haut).

[0145] De préférence, tel que cela est illustré sur les figures 3 et 4, la première loi de saturation SAT1 est appliquée à la consigne (en vitesse) brute V_{JOY} , avant le filtrage du troisième ordre F3, de sorte à former (en sortie du premier module de saturation 15) la consigne de pilotage V_u qui est alors envoyée vers le filtre du troisième ordre F3.

[0146] Par ailleurs, dans certaines situations, lorsque la longueur L du câble de suspension 6 est importante, la consigne d'exécution V_{trol} , et donc la vitesse du chariot 5, qui est donnée par la formule de conversion

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f,$$

peut dépasser la vitesse maximale admissible V_{MAX} , c'est-à-dire violer la contrainte n°4 (qui pose : $|V_{trol}| \leq V_{MAX}$), notamment si la consigne de pilotage V_u , et par conséquent la consigne de pilotage filtrée V_f qui en résulte, connaît des variations rapides, rapprochées dans le temps, et de forte amplitude.

[0147] La solution proposée par les inventeurs consiste à limiter la consigne d'exécution V_{trol} lorsque celle-ci atteint une limite admissible prédéfinie (typiquement $\pm V_{MAX}$), en saturant de manière adéquate la consigne de pilotage V_u .

[0148] Le principe est de recalculer la consigne de pilotage V_u lorsque la consigne d'exécution (et donc la vitesse du chariot 5) V_{trol} atteint la vitesse maximale admissible V_{MAX} , de manière à ce que la valeur absolue de ladite consigne d'exécution $|V_{trol}|$ reste (au plus) constante, voire diminue; en d'autres termes, on modifie la consigne de pilotage V_u afin de plafonner la consigne d'exécution V_{trol} à sa valeur maximale admissible V_{MAX} .

[0149] C'est pourquoi l'étape (b) de traitement comprend de préférence une sous-étape (b3) de saturation secondaire, qui est destinée à maintenir constante ou à faire décroître la consigne d'exécution (c'est-à-dire la consigne de vitesse du point d'accroche H) V_{trol} lorsque ladite consigne d'exécution V_{trol} atteint sensiblement la vitesse maximale V_{MAX} que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H (c'est-à-dire en pratique au chariot 5).

[0150] Mathématiquement, si l'on souhaite maintenir la consigne d'exécution V_{trol} constante, cela revient à poser $\dot{V}_{trol}$

$$0 = \dot{V}_{trol} = \dot{V}_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f, \quad \ddot{V}_f = -\frac{g}{L} \dot{V}_f.$$

= 0, donc et par conséquent

[0151] Comme, en application du filtre du troisième ordre F3, on a :

$$V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f + \frac{1}{\omega_F^3} \ddot{V}_f = V_u$$

donc

$$\ddot{V}_f = \omega_F^3 (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

alors

$$\dot{V}_{trol} = 0 \Leftrightarrow V_u = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

le second membre de la dernière équation étant noté, par commodité,

$$E(t) : E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

[0152] Comme indiqué plus haut, on cherche à maintenir la consigne d'exécution V_{trol} constante ou à la faire décroître, lorsqu'elle atteint la vitesse maximale admissible V_{max} . En outre, en pratique, si la consigne de pilotage V_u est petite, cela indique en principe que l'on recherche une vitesse de chariot, donc une consigne d'exécution V_{trol} , basse, c'est-à-dire qu'il n'y a alors pas de raison de conserver ladite consigne d'exécution V_{trol} constante à sa valeur maximale V_{MAX} , mais plutôt de la faire décroître.

[0153] C'est pourquoi, au cours de la sous-étape (b3) de saturation secondaire, on applique donc de préférence à la consigne de pilotage V_u , selon une caractéristique qui peut constituer une invention à part entière, une seconde loi de saturation SAT2 qui est exprimée par :

$$SAT2 (V_u) = MIN(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} > 0$$

et

$$SAT2 (V_u) = MAX(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} < 0,$$

avec :

V_u la consigne de pilotage (laquelle est de préférence issue du premier module de saturation, la première loi de saturation SAT1, comme indiqué sur la figure 4),

V_{trol} la consigne d'exécution (vitesse de chariot), estimée ici par la formule de conversion :

V_f la consigne de pilotage filtrée issue du filtre du troisième ordre F3, et

$$E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

c_1, c_2 les coefficients, respectivement du premier ordre et du second ordre, utilisés par le filtre du troisième ordre F3 (typiquement, on aura $c_1 = 2,15$ et $c_2 = 1,75$),

ω_F la pulsation (ici plus particulièrement la pulsation filtrée) du filtre du troisième ordre F3,

L la longueur du câble de suspension 6 qui relie la charge suspendue 1 au point d'accroche H ,

g la gravité.

[0154] Tel que cela est notamment illustré sur la figure 4, cette seconde loi de saturation SAT2 pourra être mise en oeuvre par un second module de saturation 16 approprié, formant un calculateur comprenant par exemple un circuit électronique ou un programme informatique adapté.

[0155] On notera que, par souci de stabilité, l'activation et la désactivation de cette seconde loi de saturation SAT2, au voisinage de la vitesse maximale admissible V_{MAX} , pourront s'opérer de préférence par une commutation à hystérésis.

[0156] Plus particulièrement, la seconde loi de saturation SAT2 étant initialement inactive, celle-ci sera activée lorsque la consigne d'exécution V_{trol} atteindra et dépassera un seuil d'enclenchement, légèrement supérieur à V_{MAX} , et par

exemple fixé à $1,04 \cdot V_{MAX}$ (ce qui renforce l'intérêt de choisir V_{MAX} légèrement en-deçà de la limite de vitesse physique véritable du moteur d'entraînement 7, 8 concerné, typiquement entre 95% et 98% de ladite limite physique), et être de nouveau désactivée lorsque la consigne d'exécution V_{troi} redescendra sous un seuil d'extinction strictement inférieur au seuil d'enclenchement, et valant par exemple $1,01 \cdot V_{MAX}$.

[0157] Par ailleurs, les inventeurs ont constaté que, même si la mise en oeuvre de la première loi de saturation SAT1 décrite plus haut permettait globalement de satisfaire à la contrainte n°3 (accélération du chariot devant rester inférieure à l'accélération maximale admissible a_{MAX}), certaines combinaisons très particulières de consignes de pilotage pouvaient malgré tout prendre cette contrainte n°3 en défaut.

[0158] Or, comme indiqué plus haut, l'application d'une consigne d'exécution V_{troi} qui ne respecterait les limites matérielles, notamment la capacité d'accélération, des moteurs d'entraînement 7, 8, risquerait de conduire à l'exécution d'un mouvement non conforme au mouvement attendu, et par conséquent à l'apparition d'un ballant.

[0159] C'est notamment pourquoi, afin de sécuriser le mouvement de la charge suspendue 1 et de garantir le contrôle et la précision dudit mouvement, l'étape (b) de traitement comprend de préférence, selon une caractéristique qui peut constituer une invention à part entière mais qui sera préférentiellement mise en oeuvre en complément de la première loi de saturation SAT1, une sous-étape (b5) de saturation de la dérivée troisième de la consigne de pilotage filtrée au cours de laquelle on applique à la dérivée (temporelle) troisième $\dot{V}_f$ de la consigne de pilotage filtrée V_f une troisième loi de saturation SAT3 dont les seuils de saturation dépendent de l'accélération maximale a_{MAX} (typiquement telle que définie plus haut) que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1.

[0160] La mise en oeuvre de cette troisième loi de saturation SAT3 peut avantageusement ajouter une précaution supplémentaire à celle procurée par la première loi de saturation SAT1, afin d'optimiser la sécurité de la commande en boucle ouverte selon l'invention.

[0161] Plus préférentiellement, la troisième loi de saturation SAT3 pourra s'exprimer par :

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \omega_F^3 \times (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

si

$$\frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX}) \leq \ddot{V}_f \leq \frac{g}{L} (-\dot{V}_f + a_{MAX}),$$

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f < \frac{g}{L} (-\dot{V}_f - a_{MAX})$$

et

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L} (-\dot{V}_f + a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f > \frac{g}{L} (-\dot{V}_f + a_{MAX})$$

avec :

V_f la consigne de pilotage filtrée issue du filtre du troisième ordre F3,
 ω_F la pulsation (ici plus particulièrement la pulsation filtrée) du filtre du troisième ordre F3,
 c_1, c_2 les coefficients, respectivement du premier ordre et du second ordre, utilisés par le filtre du troisième ordre F3,
 L la longueur du câble de suspension 6 qui relie la charge suspendue 1 au point d'accroche H,
 g la gravité et
 a_{MAX} une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement 7, 8 peut conférer au point d'accroche H auquel est suspendue la charge 1, ladite valeur d'accélération maximale étant typiquement définie comme cela a été décrit plus haut.

[0162] Tel que cela est notamment illustré sur la figure 4, la troisième loi de saturation SAT3 pourra être mise en oeuvre par un troisième module de saturation 17 approprié, formant un calculateur comprenant par exemple un circuit électronique ou un programme informatique adapté.

[0163] On notera que, avantageusement, le raisonnement et les équations proposées ci-dessus trouvent à s'appliquer

si l'on considère la situation réelle, en trois dimensions.

[0164] En effet, si l'on considère la grue dans un repère cartésien tridimensionnel (X, Y, Z), où Z représente l'axe

vertical, ici confondu avec le mât 3, on peut toujours écrire la loi de Newton :

[0165] En faisant l'hypothèse des petits angles de ballant, on a, en projection respectivement sur l'axe X et sur l'axe

Y :

$$\frac{P_{trol}^X - P_{load}^X}{L} = \frac{a_X}{g - a_Z} \quad \text{et} \quad \frac{P_{trol}^Y - P_{load}^Y}{L} = \frac{a_Y}{g - a_Z}$$

avec a_X , a_Y et a_Z les composantes respectives

en X, en Y et en Z de l'accélération de la charge suspendue 1.

[0166] Selon une première possibilité de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, on pourrait, dans l'absolu, conserver, pour le calcul de la consigne d'exécution V_{trol} , et plus particulièrement pour le calcul des composantes cartésiennes V_{trol}^X et V_{trol}^Y de ladite consigne d'exécution, des expressions qui font apparaître l'accélération verticale a_Z de la charge suspendue 1, de manière à pouvoir compenser également les effets potentiels de ladite accélération verticale de la charge suspendue 1 sur la génération de ballant.

[0167] Toutefois, selon une seconde possibilité préférentielle de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, on pourra en pratique considérer, à titre d'hypothèse simplificatrice, que l'accélération de la charge suspendue a_Z est négligeable au regard de la pesanteur g .

[0168] En simplifiant en conséquence les expressions ci-dessus, on retrouve :

$$\frac{P_{trol}^X - P_{load}^X}{L} \approx \frac{a_X}{g} \quad \text{et} \quad \frac{P_{trol}^Y - P_{load}^Y}{L} \approx \frac{a_Y}{g}$$

[0169] En dérivant (différentiant) ensuite ces expressions par rapport au temps, et en considérant, par simplification réaliste, que la vitesse de variation dL/dt de la longueur L du câble de suspension 6 est négligeable, on obtient :

$$V_{trol}^X = V_{load}^X + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}^X \quad \text{et} \quad V_{trol}^Y = V_{load}^Y + \frac{L}{g} \frac{d^2}{dt^2} V_{load}^Y$$

[0170] Par ailleurs, on notera que le procédé selon l'invention est particulièrement polyvalent car il peut s'appliquer à tout type d'engin de levage 2, quelle que soit la configuration dudit engin de levage 2, dans la mesure où ledit procédé permet avantageusement de calculer de toute manière la consigne d'exécution V_{trol} de manière simple dans un repère cartésien, quel que soit par ailleurs le système de coordonnées (cartésiennes, cylindriques ou sphériques), propre à l'engin de levage 2, dans lequel est d'abord exprimée la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} lorsqu'elle est fixée par le conducteur de l'engin, puis dans lequel la consigne d'exécution V_{trol} doit être exprimée pour que ladite consigne d'exécution puisse être convenablement appliquée aux moteurs d'entraînement 7,8 concernés.

[0171] En effet, il suffit tout d'abord de convertir en coordonnées cartésiennes, au moyen d'une matrice de transformation géométrique (du genre matrice de rotation), caractéristique de l'engin de levage 2 utilisé, et que l'on notera R_θ , les composantes de la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} initialement exprimées dans le système de coordonnées propre à l'engin de levage 2, puis de calculer la consigne d'exécution V_{trol} dans ledit repère cartésien, et enfin de convertir à nouveau, au moyen d'une matrice de transformation inverse, que l'on notera $R_{-\theta}$, les composantes cartésiennes de ladite consigne d'exécution V_{trol} en composantes exprimées dans le système de coordonnées propre à l'engin de levage 2, applicables aux moteurs d'entraînement 7, 8 qui gèrent respectivement le déplacement dudit engin 2 (et plus particulièrement du chariot 5) selon chacune desdites composantes.

[0172] Ainsi, dans le cas d'un engin de levage 2 formé par une grue à flèche horizontale (grue à tour à flèche horizontale), le système de coordonnées le plus approprié audit engin 2 sera un système de coordonnées cylindriques dans lequel la position de l'objet considéré est repérée par un rayon r (le long de la flèche) et un angle d'azimut θ (angle de lacer autour de l'axe d'orientation), tel que cela est illustré sur les figures 1 et 5.

[0173] Le pilotage de la grue s'effectuant - de manière assez intuitive pour le conducteur - en distribution (modification du rayon r) et en orientation (modification de l'azimut θ), la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} , de même que la consigne d'exécution V_{trol} , comprendront donc chacune une composante de distribution, destinée au moteur 7 de distribution (qui permet d'agir sur le rayon) et une composante d'orientation, destinée au moteur 8 d'orientation (qui permet de d'agir sur l'azimut).

[0174] La première conversion (de la consigne de pilotage V_u , V_{JOY}) depuis le système cylindrique vers le système cartésien pourra s'opérer au moyen d'une matrice de rotation R_θ , tandis que la seconde conversion (de la consigne

d'exécution V_{trol}) depuis le système cartésien vers le système cylindrique pourra s'opérer au moyen d'une matrice de rotation inverse R_{-0} .

[0175] De manière analogue, dans le cas d'un engin de levage 2 formé par une grue à flèche relevable, le système de coordonnées le plus approprié sera le système de coordonnées sphériques, dans lequel la position du chariot 5 est repérée (et pilotée) par son azimut (orientation de la flèche relevable en lacet), sa déclinaison (orientation de la flèche relevable en tangage) et par son rayon (distance du chariot par rapport à la base articulée de la flèche relevable).

[0176] Ici encore, les conversions vers et depuis le système cartésien seront opérées par des matrices de transformation géométrique appropriées, de manière à pouvoir gérer le moteur d'entraînement en azimut (lacet) de la flèche, le moteur d'entraînement en déclinaison (tangage) de la flèche, et le moteur d'entraînement en rayon (translation le long de la flèche).

[0177] Dans le cas d'un engin de levage 2 de type pont roulant, conçu pour réaliser des mouvements linéaires de translation selon un axe (X), ou selon deux axes perpendiculaires l'un à l'autre (X et Y), la consigne de pilotage pourra être directement exprimée dans un repère cartésien (X, Y), et ne nécessitera donc aucune conversion de coordonnées.

[0178] En pratique, et tel que cela est illustré sur la figure 6, le procédé selon l'invention pourra donc comporter successivement les opérations suivantes :

- la position de la charge suspendue 1 est donnée dans un système de coordonnées adapté à l'engin de levage 2, ici préférentiellement en coordonnées cylindriques : r_{load} , θ_{load} ;
- la consigne de pilotage (brute) V_{JOY} est exprimée par le conducteur de l'engin (via le joystick 11) sous forme d'une consigne de vitesse de charge suspendue V_{load} , dont les composantes correspondent au système de coordonnées considéré ; ici ladite consigne de vitesse de charge suspendue V_{load} , comprend (est décomposée en) une composante de vitesse de charge radiale souhaitée V_{load}^r et une composante de vitesse de charge angulaire souhaitée V_{load}^θ ;
- les composantes de la consigne de vitesse de charge suspendue V_{load} sont alors régularisées C^3 , et plus particulièrement filtrées à cet effet par le filtre du troisième ordre F3 ;
- ainsi, la première composante de la consigne de vitesse de charge suspendue, ici la composante de vitesse de charge radiale souhaitée V_{load}^r , est régularisée C^3 , et plus particulièrement filtrée par le filtre du troisième ordre F3 (module de filtrage 12), pour obtenir une consigne de vitesse de charge radiale filtrée V_{load}^{rf} (c'est-à-dire la première composante de la consigne de pilotage filtrée V_f) ;
- de même, la seconde composante de la consigne de vitesse de charge suspendue, ici la composante de vitesse de charge angulaire souhaitée V_{load}^θ , est régularisée C^3 , et plus particulièrement est filtrée par le filtre du troisième ordre F3 (module de filtrage 12), pour obtenir une consigne de vitesse de charge angulaire filtrée, puis elle est multipliée par le rayon r_{load} , qui correspond à la distance à laquelle la charge suspendue 1 se trouve de l'axe de rotation vertical (ZZ'), de manière à obtenir une consigne de vitesse tangentielle (orthoradiale) filtrée $V_{load}^{\theta f}$ (c'est-à-dire la seconde composante de la consigne de pilotage filtrée V_f) ;
- la consigne de vitesse de charge filtrée (consigne de pilotage filtrée V_f), dont les composantes, ici radiale et tangentielle, sont désormais connues, est alors exprimée dans un repère cartésien en appliquant une matrice de transformation géométrique, ici la matrice de rotation $R_{\theta_{load}}$ qui correspond à la position angulaire en lacet θ_{load} de la charge suspendue 1 : $(V_{load}^{Xf}, V_{load}^{Yf}) = R_{\theta_{load}} (V_{load}^{rf}, V_{load}^{\theta f})$;
- sur chaque axe X et Y dudit repère cartésien, on peut alors déterminer, grâce à la formule de conversion (module de conversion 13), la composante correspondante de la consigne d'exécution (consigne de vitesse de chariot) V_{trol} :

$$V_{trol}^X = V_{load}^{Xf} + \frac{L}{g} \ddot{V}_{load}^{Xf} \quad \text{et} \quad V_{trol}^Y = V_{load}^{Yf} + \frac{L}{g} \ddot{V}_{load}^{Yf} ;$$

- la consigne d'exécution (consigne de vitesse de chariot) V_{trol} , disponible en coordonnées cartésiennes est alors exprimée dans le système de coordonnées adapté à l'engin de levage, en l'espèce en coordonnées cylindriques, en appliquant une matrice de transformation géométrique inverse, ici une matrice de rotation inverse $R_{-\theta_{trol}}$ qui correspond à la position angulaire en lacet θ_{trol} du chariot 5 : $(V_{trol}^r, V_{trol}^\theta) = R_{-\theta_{trol}} (V_{trol}^X, V_{trol}^Y)$;
- les composantes de la consigne d'exécution V_{trol} sont alors appliquées chacune à leur moteur d'entraînement 7, 8 respectif; ainsi, la composante radiale V_{trol}^r de la consigne d'exécution V_{trol} est alors appliquée au moteur de distribution 7,
- tandis que la composante tangentielle V_{trol}^θ de ladite consigne d'exécution V_{trol} est convertie en consigne de vitesse angulaire de chariot, par multiplication par $1/r_{trol}$, où r_{trol} représente la distance du chariot 5 à l'axe de rotation vertical (ZZ'), puis appliquée au moteur d'orientation (giration en lacet) 8.

[0179] On notera par ailleurs que les coordonnées cylindriques du chariot 5 (point d'accroche H) peuvent être aisément connues (en temps réel), par exemple au moyen d'une part d'un capteur de position angulaire qui renseigne sur la

position angulaire en lacet de la flèche 4 par rapport au mât 3, c'est-à-dire sur la position angulaire en lacet θ_{trol} du chariot 5, et d'autre part au moyen d'un capteur de position, par exemple associé au moteur d'entraînement en distribution 7, qui permet de connaître la position du chariot 5 (en translation) le long de la flèche 4, et par conséquent la distance radiale r_{trol} à laquelle ledit chariot 5 se trouve de l'axe vertical de rotation (ZZ').

[0180] De même, la longueur L du câble de suspension 6 pourra être connue en temps réel au moyen d'un capteur mesurant la rotation absolue du treuil ou du moteur de levage qui génère l'enroulement dudit câble de suspension 6.

[0181] La position angulaire en lacet θ_{load} de la charge suspendue 1, ainsi que la distance (radiale) r_{load} de ladite charge suspendue par rapport à l'axe vertical de rotation (ZZ') pourront être estimées par intégration (sur le temps) des composantes de la consigne de pilotage filtrée V_f , puisque lesdites composantes correspondent ici respectivement à la vitesse radiale de charge filtrée V_{load}^{rf} et à la vitesse angulaire de charge filtrée V_{load}^{of} .

[0182] Ainsi, plus particulièrement, on pourra évaluer une position radiale estimée $r_{\text{load_estim}}$ de la charge suspendue 1 comme :

$$r_{\text{load_estim}}(t) = \int_0^t V_{\text{load}}^{rf} dt + r_{\text{load}}(0)$$

[0183] On notera à ce titre que, lorsque l'engin de levage 2, et plus particulièrement la charge suspendue 1, se trouve au repos, de telle sorte que ladite charge suspendue 1 pend sensiblement à la verticale du chariot 5, la position angulaire en lacet et la distance à l'axe de rotation de la charge suspendue 1 sont identiques respectivement à la position angulaire en lacet et à la distance à l'axe de rotation du chariot 5, elles-mêmes mesurées comme indiqué ci-dessus.

[0184] On pourra donc poser, comme condition initiale (et donc comme paramètre d'étalonnage) du calcul intégral susmentionné : $r_{\text{load}}(0) = r_{\text{trol}}(0)$, où « 0 » correspond à un instant initial où le système se trouve au repos.

[0185] Le cas échéant, pour améliorer la précision de l'estimation de la position radiale de la charge suspendue 1, on pourra utiliser un observateur (matrice d'observation) faisant intervenir une mesure supplémentaire de la position radiale du chariot 5.

[0186] Par ailleurs, on notera que la régularisation C^3 , et plus particulièrement le filtrage du troisième ordre $F3$, pourra être appliqué(e) à un (seul) mouvement caractéristique de l'engin de levage 2 (typiquement le mouvement de rotation en orientation ou bien le mouvement de translation en distribution dans l'exemple préféré illustré sur les figures 1 et 6), c'est-à-dire à une seule des composantes de la consigne de pilotage V_u , V_{JOY} , ou bien à plusieurs desdits mouvements caractéristiques (c'est-à-dire à plusieurs desdites composantes), ou, de préférence, à l'ensemble desdits mouvements caractéristiques (c'est-à-dire à l'ensemble des composantes de la consigne de pilotage).

[0187] L'invention concerne par ailleurs bien entendu en tant que telle l'utilisation d'une régularisation C^3 , et plus particulièrement l'utilisation d'un filtre du troisième ordre $F3$, et le cas échéant, l'utilisation de l'une et/ou l'autre des lois de saturation SAT1, SAT2, SAT3, dans la détermination d'une consigne d'exécution V_{trol} destinée à être appliquée à un moteur d'entraînement 7, 8 permettant de déplacer une charge suspendue 1 à un engin de levage 2, selon l'une ou l'autre des modalités décrites dans ce qui précède.

[0188] A ce titre, on notera que l'invention porte en tant que telle sur la mise en oeuvre d'une régularisation C^3 , et plus particulièrement sur la mise en oeuvre du filtre du troisième ordre $F3$, respectivement de tout ou partie des lois de saturation, quelle que soit par ailleurs le type de calcul employé pour déterminer ensuite les composantes de la consigne d'exécution V_{trol} .

[0189] L'invention concerne également un boîtier de commande pour engin de levage, comprenant l'un et/ou l'autre des modules (c'est-à-dire des calculateurs, électroniques et/ou informatiques) de régularisation C^3 /filtrage de troisième ordre 12, de conversion 13, d'ajustement de pulsation 14, ou de saturation 15, 16, 17 décrits plus haut, ainsi qu'un engin de levage 2 équipé d'un tel boîtier de commande.

[0190] Enfin, l'invention n'est bien entendu nullement limitée aux seules variantes de réalisation décrites, l'homme du métier étant notamment à même d'isoler ou de combiner librement entre elles l'une ou l'autre des caractéristiques mentionnées dans ce qui précède, ou encore de leur substituer des équivalents.

Revendications

1. Procédé de commande du déplacement d'une charge (1) suspendue à un point d'accroche (H) d'un engin de levage (2), ledit procédé comprenant une étape (a) d'acquisition de consigne de pilotage, au cours de laquelle on acquiert une consigne dite « consigne de pilotage » (V_u) qui est représentative d'une vitesse de déplacement (V_{load}) que le conducteur de l'engin de levage souhaite conférer à la charge (1) suspendue, puis une étape (b) de traitement au cours de laquelle on élabore, à partir de ladite consigne de pilotage (V_u), une consigne dite « consigne d'exécution » (V_{trol}) qui est destinée à être appliquée à au moins un moteur d'entraînement (7, 8) afin de déplacer la charge

suspendue (1), le procédé étant **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comporte une sous-étape (b4) de régularisation C^3 au cours de laquelle on traite la consigne de pilotage (V_u) de manière à conférer à ladite consigne de pilotage (V_u) des propriétés de dérivabilité troisième par rapport au temps et de continuité par rapport au temps, afin de générer, à partir de ladite consigne de pilotage (V_u), une consigne de pilotage filtrée (V_f) qui est de classe C^3 , puis l'on définit la consigne d'exécution (V_{trol}) à partir de ladite consigne de pilotage filtrée (V_f).

2. Procédé selon la revendication 1 **caractérisé en ce que** la consigne d'exécution (V_{trol}) exprime la consigne de vitesse que doit atteindre le point d'accroche (H), et est définie comme suit :

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

avec :

V_f la consigne de pilotage filtrée,
L la longueur du câble de suspension (6) qui relie la charge suspendue (1) au point d'accroche (H),
g la gravité.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2 **caractérisé en ce que**, lors de la sous-étape (b4) de régularisation C^3 , on fait intervenir, pour générer la consigne de pilotage filtrée (V_f), un paramètre (ω , ω_0) qui est représentatif de l'accélération maximale (a_{MAX}) que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1), afin que la consigne d'exécution (V_{trol}) qui découle de ladite consigne de pilotage filtrée (V_f) dépende de ladite accélération maximale de manière à être réalisable par ledit moteur d'entraînement (7, 8).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que**, lors de la sous-étape (b4) de régularisation C^3 , on applique à la consigne de pilotage (V_u) un filtre du troisième ordre (F3) afin de générer la consigne de pilotage filtrée (V_f) qui est de classe C^3 .

5. Procédé selon les revendications 3 et 4 **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b1) de réglage de la pulsation du filtre du troisième ordre (F3), au cours de laquelle on calcule la pulsation (ω , ω_0) dudit filtre du troisième ordre (F3) à partir d'une valeur (a_{MAX}) qui est représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1).

6. Procédé selon la revendication 4 ou 5 **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b1) de réglage de la pulsation (ω , ω_0 , ω_F) du filtre du troisième ordre (F3), au cours de laquelle on adapte la pulsation (ω , ω_0 , ω_F) du filtre du troisième ordre (F3) en fonction de la valeur de la consigne de pilotage (V_u) appliquée par le conducteur de l'engin de levage à l'instant considéré, et plus préférentiellement on modifie la valeur de la pulsation (ω , ω_0 , ω_F) du filtre du troisième ordre (F3) selon que la consigne de pilotage (V_u) est inférieure ou au contraire supérieure à une vitesse de référence (V_{thresh}) qui est définie à partir de la valeur de vitesse maximale (V_{MAX}) que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1).

7. Procédé selon l'une des revendications 4 à 6 **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b1) de réglage de la pulsation du filtre du troisième ordre, au cours de laquelle on calcule la pulsation (ω) du filtre du troisième ordre (F3) à partir d'une pulsation calculée (ω_0) déterminée comme suit :

on choisit $V_{thresh} = k \cdot V_{MAX}$, avec $0 < k < 1$, par exemple $k = 0,5$;
si $V_u \leq V_{thresh}$, alors on définit la pulsation calculée (ω_0) à une valeur haute valant

$$\omega_0 = \omega_{high} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{thresh} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

si $V_u > V_{thresh}$, alors on définit la pulsation calculée (ω_0) à une valeur basse valant

$$\omega_0 = \omega_{low} = \left(\frac{a_{MAX} \times g}{V_{MAX} \times L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

avec :

V_u la consigne de pilotage,

L la longueur du câble de suspension (6) qui relie la charge suspendue (1) au point d'accroche (H),

g la gravité

V_{MAX} une valeur représentative de la vitesse maximale que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1) et

a_{MAX} une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1).

8. Procédé selon la revendication 7 **caractérisé en ce que**, lors de la sous-étape (b1) de réglage de la pulsation du filtre du troisième ordre (F3), on applique à la pulsation calculée (ω , ω_0) un filtre du second ordre (F2), de manière à ce que le filtre du troisième ordre utilise une pulsation calculée filtrée (ω_F), ladite pulsation calculée filtrée (ω_F) étant ainsi préférentiellement définie comme :

$$\omega_F(p) = \frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_X} + \frac{p^2}{\omega_X^2}} \omega_0(p)$$

avec :

ω_0 la pulsation calculée, avant filtrage du second ordre (F2),

ω_X la pulsation propre du filtre du second ordre (F2), par exemple égale à 4 rad/s,

m le coefficient d'amortissement du filtre du second ordre (F2), de préférence égal à 0,7.

9. Procédé selon l'une des revendications 4 à 8 **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b2) de saturation préliminaire, au cours de laquelle on applique à la consigne de pilotage (V_u) une première loi de saturation (SAT1) qui est calculée en fonction de la pulsation (ω , ω_F) du filtre du troisième ordre (F3).

10. Procédé selon la revendication 9 **caractérisé en ce que** la première loi de saturation (SAT1) s'exprime par :

$$SAT1(V_u) = V_u \text{ si } -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \leq V_u \leq \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u < -\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

$$SAT1(V_u) = +\frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX} \text{ si } V_u > \frac{g}{L\omega_F^3} a_{MAX}$$

avec

V_u la consigne de pilotage,

ω_F la pulsation du filtre du troisième ordre (F3),

L la longueur du câble de suspension (6) qui relie la charge suspendue (1) au point d'accroche (H),

g la gravité et

a_{MAX} une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1).

11. Procédé selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b3) de saturation secondaire, qui est destinée à maintenir constante ou à faire décroître la consigne d'exécution (V_{trol}) lorsque ladite consigne d'exécution atteint sensiblement la vitesse maximale (V_{MAX}) que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H).

12. Procédé selon les revendications 11 et 4 **caractérisé en ce que**, au cours de la sous-étape (b3) de saturation secondaire, on applique à la consigne de pilotage (V_u) une seconde loi de saturation (SAT2) exprimée par :

$$SAT2(V_u) = MIN(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} > 0$$

et

$$SAT2(V_u) = MAX(E(t), V_u) \text{ si } V_{trol} < 0,$$

avec :

$$V_{trol} = V_f + \frac{L}{g} \ddot{V}_f$$

V_u la consigne de pilotage,

V_{trol} la consigne d'exécution, estimée par :

V_f la consigne de pilotage filtrée issue du filtre du troisième ordre (F3), et

$$E(t) = V_f + \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f + \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f - \frac{g}{L\omega_F^3} \dot{V}_f$$

avec c_1, c_2 les coefficients, respectivement du premier ordre et du second ordre, utilisés par le filtre du troisième ordre (F3),

ω_F la pulsation du filtre du troisième ordre (F3),

$\frac{L}{g}$ la longueur du câble de suspension (6) qui relie la charge suspendue (1) au point d'accroche (H),
 g la gravité.

13. Procédé selon l'une des revendication précédentes **caractérisé en ce que** l'étape (b) de traitement comprend une sous-étape (b5) de saturation de la dérivée troisième de la consigne de pilotage filtrée au cours de laquelle on applique à la dérivée troisième ($\ddot{V}_f$) de la consigne de pilotage filtrée (V_f) une troisième loi de saturation (SAT3) dont les seuils de saturation dépendent de l'accélération maximale (a_{MAX}) que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) de la charge suspendue(1).

14. Procédé selon les revendications 13 et 4 **caractérisé en ce que** la troisième loi de saturation (SAT3) s'exprime par :

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \omega_F^3 \times (V_u - V_f - \frac{c_1}{\omega_F} \dot{V}_f - \frac{c_2}{\omega_F^2} \ddot{V}_f)$$

si

$$\frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX}) \leq \ddot{V}_f \leq \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX}),$$

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f < \frac{g}{L}(-\dot{V}_f - a_{MAX})$$

et

$$SAT3(\ddot{V}_f) = \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX}) \text{ si } \ddot{V}_f > \frac{g}{L}(-\dot{V}_f + a_{MAX})$$

EP 3 305 710 A1

avec

V_f la consigne de pilotage filtrée issue du filtre du troisième ordre (F3),

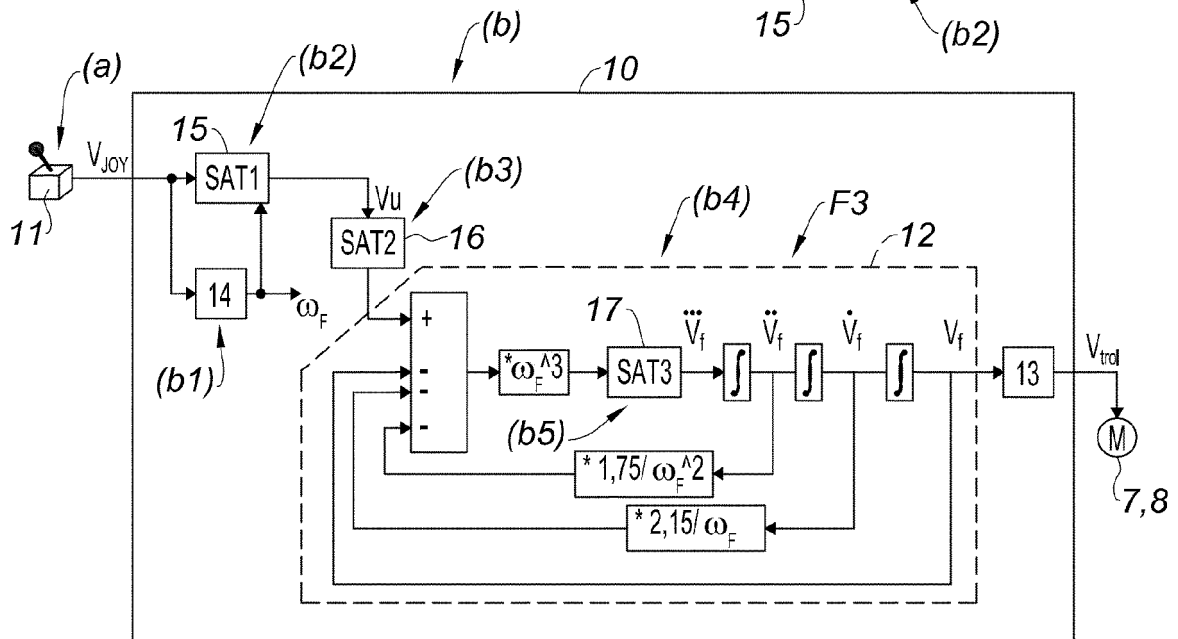
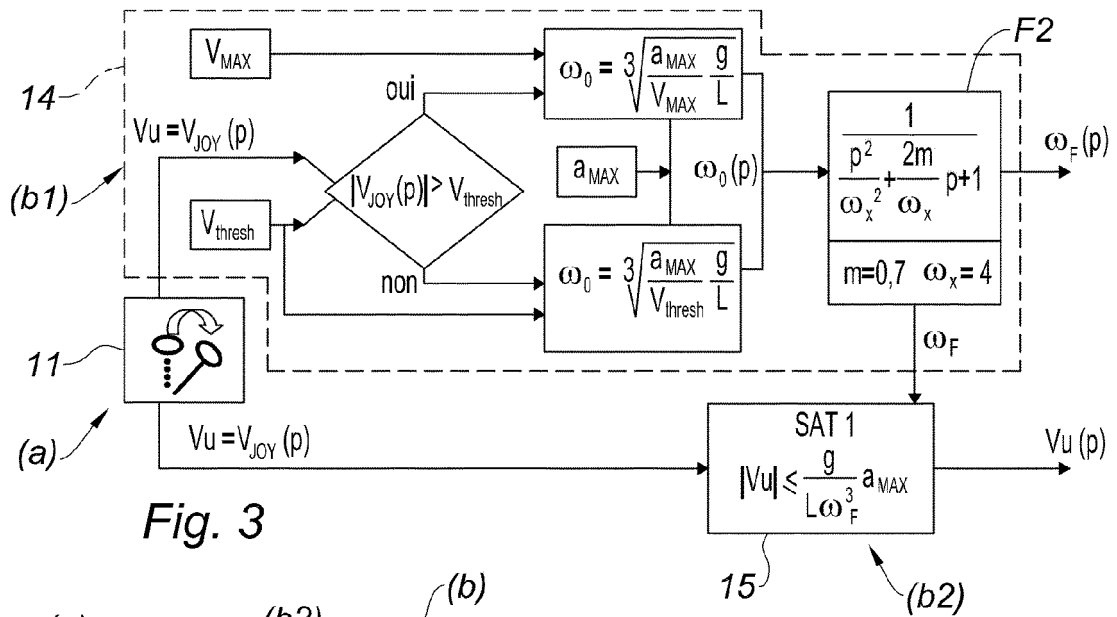
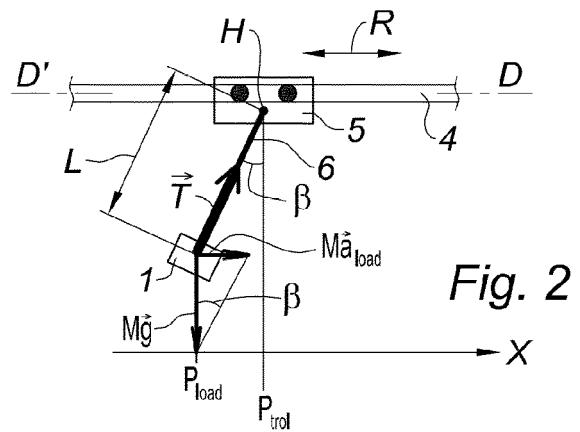
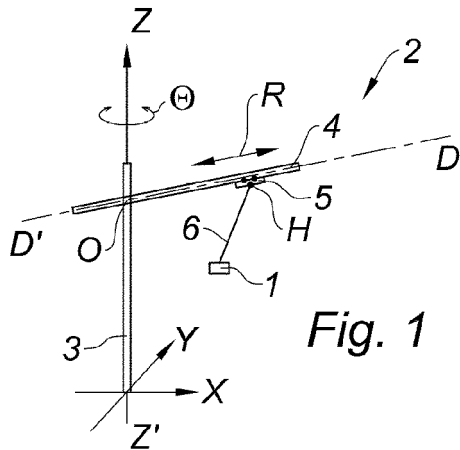
ω_F la pulsation du filtre du troisième ordre (F3),

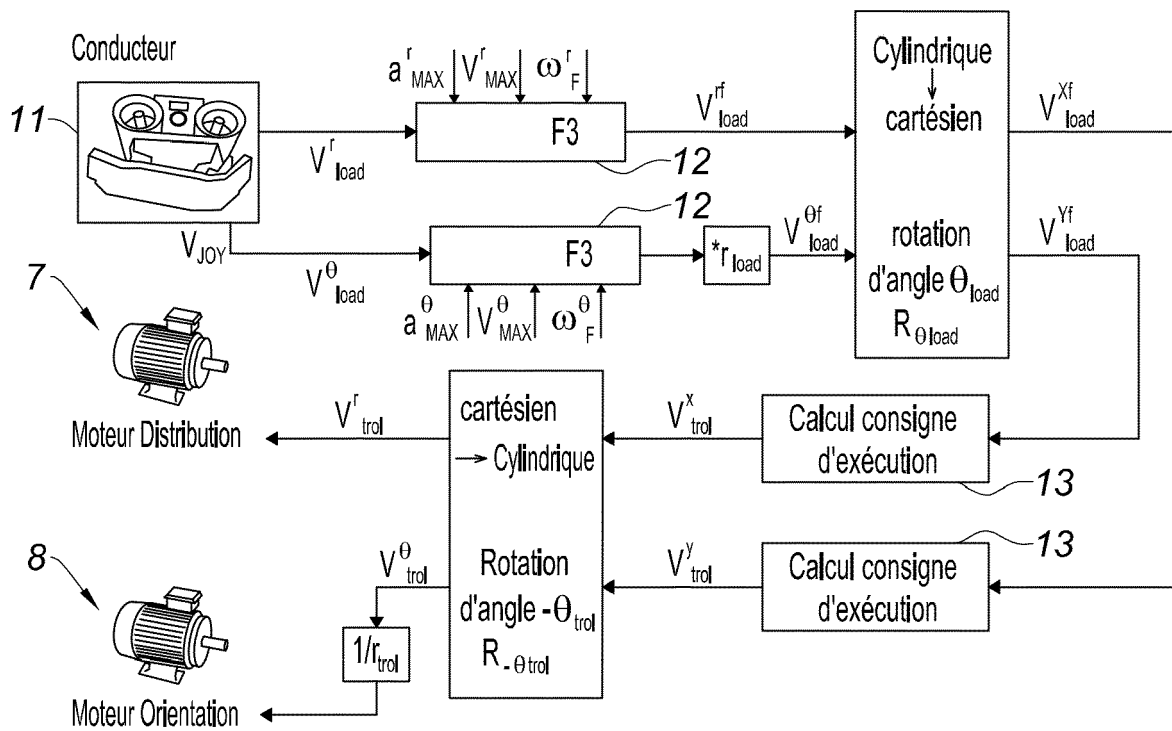
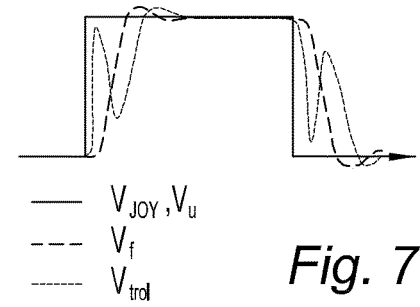
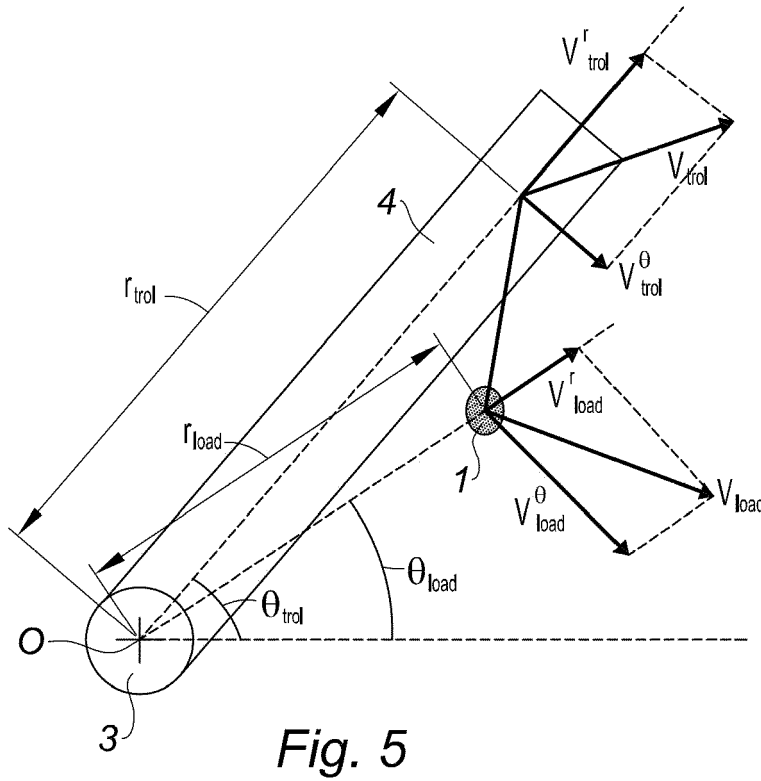
c_1, c_2 les coefficients, respectivement du premier ordre et du second ordre, utilisés par le filtre du troisième ordre (F3),

L la longueur du câble de suspension (6) qui relie la charge suspendue (1) au point d'accroche (H),

g la gravité et

a_{MAX} une valeur représentative de l'accélération maximale que le moteur d'entraînement (7, 8) peut conférer au point d'accroche (H) auquel est suspendue la charge (1).







RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 17 19 0875

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

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	FR 3 016 872 A1 (MANITOWOC CRANE GROUP FRANCE [FR]) 31 juillet 2015 (2015-07-31) * abrégé * * figure 2 *	1	INV. B66C13/06
A	EP 1 652 810 A1 (SINTOKOGIO LTD [JP]; TERASHIMA KAZUHIKO [JP]) 3 mai 2006 (2006-05-03) * abrégé *	1	
A	US 9 120 650 B2 (LANGER KARL [AT] ET AL) 1 septembre 2015 (2015-09-01) * abrégé * * colonne 5, ligne 65 - colonne 12, ligne 49 * * figures *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			B66C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		15 février 2018	Sheppard, Bruce
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 17 19 0875

5 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.

15-02-2018

10

Document brevet cité
au rapport de recherche

Date de
publication

Membre(s) de la
famille de brevet(s)

Date de
publication

FR 3016872 A1 31-07-2015 CN 104817016 A 05-08-2015

DE 102015100669 A1 30-07-2015

FR 3016872 A1 31-07-2015

15

EP 1652810 A1 03-05-2006 CN 1832898 A 13-09-2006

EP 1652810 A1 03-05-2006

JP 4023749 B2 19-12-2007

JP W02005012155 A1 27-09-2007

20

US 2008275610 A1 06-11-2008

WO 2005012155 A1 10-02-2005

US 9120650 B2 01-09-2015 CN 103303799 A 18-09-2013

DE 102012004914 A1 12-09-2013

EP 2636635 A1 11-09-2013

25

JP 6193590 B2 06-09-2017

JP 2013184825 A 19-09-2013

KR 20130103364 A 23-09-2013

US 2013245816 A1 19-09-2013

30

35

40

45

50

55

EPO FORM P0460

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