



## EQUILIBRAGE DES MANIPULATEURS MANUELS

VIGUEN ARAKELIAN

Département de Construction Mécanique, ENPA, 105 rue Terian, 375009 Erévan, Arménie and L.R.P.,  
UPMC UVSQ CNRS, 10–12 avenue de l'Europe, 78140 Vélizy, France

(Received 3 January 1995; received in revised form 15 November 1996)

**Résumé**—Une méthode d'équilibrage des manipulateurs manuels du type pantographe basée sur l'étude du mouvement du centre général des masses des éléments mobiles de l'actionneur du manipulateur est proposée dans cet article. Les conditions d'équilibrage relative aux manipulateurs manuels sont formulées à cet effet. L'application de cette méthode donne la possibilité de créer des nouveaux manipulateurs manuels sans système-moteur, permettant d'effectuer manuellement le mouvement de l'objet manipulé aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. L'exclusion du système-moteur du manipulateur se rend possible grâce à un moyen d'équilibrage non-traditionnel. Pour cela, les paramètres de l'actionneur sont déterminés à partir des conditions d'équilibrage des poids des éléments: l'actineur et le poids de "l'objet conventionnel manipulé" (soit la pièce ébauchée soit la pièce usinée). Sur la base de cette méthode, on propose les schémas cinématiques des manipulateurs manuels le plus optimales.

© 1997 Elsevier Science Ltd

## 1. INTRODUCTION

En vue de mécaniser les travaux de déplacement de pièces dans différentes branches de constructions mécaniques, en particulier, pour le chargement et le déchargement des pièces lourdes lors de leur usinage sur les machines-outils, ainsi que pour la mécanisation des opérations d'assemblage, etc., on utilise des systèmes de manutention à commande manuelle relativement simple—dits manipulateurs manuels (fig. 1) [1–6].

L'application fonctionnelle des manipulateurs manuels (MM), consiste à assurer un déplacement horizontal de la charge sans la nécessité d'exercer un effort considérable de la part de l'opérateur. Un vérin lié cinématiquement avec le système moteur assure un déplacement vertical.

Parmi le peu d'ouvrages existants actuellement, on pourrait noter les études [4–6] dans lesquelles, par l'application du principe des déplacements virtuels, on démontre que pour l'équilibrage complet des éléments du pantographe de Sheiner, il est nécessaire d'appliquer à l'élément AD (v. fig. 1), un moment  $M_{eq} = M \sin \varphi$ , où  $M$  est le moment constant dépendant des dimensions et des masses des éléments du pantographe.

Différentes méthodes de réalisation de la loi sinusoïdale de la variation du moment équilibrant sont étudiées en [5]. On apporte ici, en employant un élément linéaire élastique, une analyse des

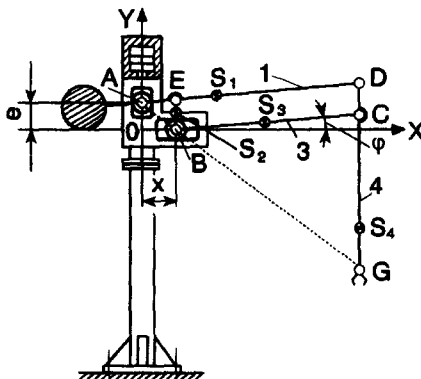


Fig. 1. Manipulateur manuel du type pantographe.

méthodes d'équilibrage des MM à l'aide d'une force constante. Les relations analytiques de l'effort horizontal de l'opérateur en fonction des paramètres et la configuration du pantographe sont donnés dans l'ouvrage [6].

Dans cet article, une méthode d'équilibrage du manipulateur manuel du type pantographe est proposée. Elle est basée sur l'étude du mouvement de son centre des masses.

## 2. METHODOLOGIE DE RESOLUTION

Le mouvement du centre général des masses des éléments mobiles du mécanisme pantographique de la fig. 2 d'après l'axe OY, se détermine par l'expression [7]:

$$y_s = (m_{1A}y_A + m_{1E}y_E + (m_{1D} + m_{4D})y_D + m_2y_2 + m_3y_3 + m_{4C}y_C + m_{4G}y_G) / \sum_{i=1}^4 m_i,$$

où

$$y_2 = l_1 \sin \varphi_1 + (l_2 - r_2) \sin \varphi_2 + e \cos \theta;$$

$$y_3 = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 - r_3 \sin \varphi_3 + e \cos \theta;$$

$$y_A = e \cos \theta;$$

$$y_C = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_3 + e \cos \theta;$$

$$y_D = l_1 \sin \varphi_1 - l_3 \sin \varphi_3 + e \cos \theta;$$

$$y_E = l_1 \sin \varphi_1 + e \cos \theta;$$

$$y_G = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_3 - l_4 \sin \varphi_4 + e \cos \theta.$$

Cette relation peut être présentée sous forme:

$$y_s = \left\{ \sum_{i=1}^4 \alpha_i \sin \varphi_i + \sum_{i=1}^4 m_i e \cos \theta \right\} / \sum_{i=1}^4 m_i, \quad (1)$$

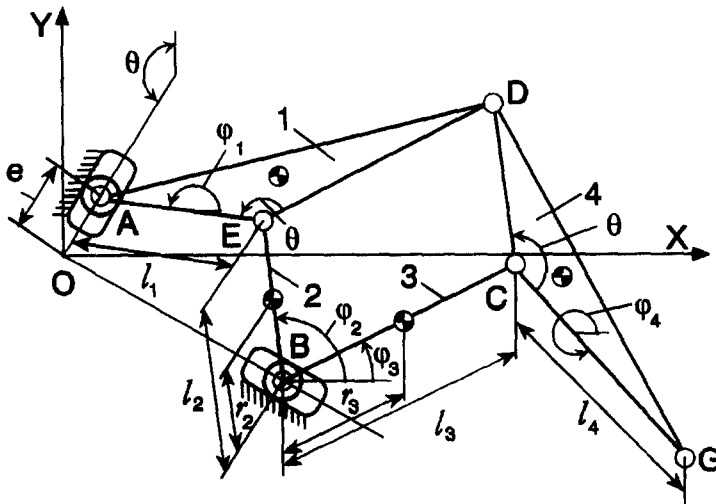


Fig. 2. Mécanisme pantographique (type générale).

où

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= (m_{1E} + m_{1D} + m_2 + m_3 + m_4)l_1; \\ \alpha_2 &= m_2(l_2 - r_2) + m_3l_2 + (m_{4C} + m_{4G})l_2; \\ \alpha_3 &= -(m_{1D} + m_4)l_3 - m_3r_3; \\ \alpha_4 &= -m_Gl_4.\end{aligned}$$

Pour que l'opérateur puisse déplacer la charge horizontalement, supportant seulement les forces de friction, il est nécessaire que le travail total des forces de gravité des éléments de l'actionneur soit égal à zéro. Dans ce but, le centre des masses du mécanisme pantographique doit uniquement se déplacer dans la direction horizontale (ou doit être fixe), c'est-à-dire  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$ .

Le pantographe de Scheiner, essentiellement, est mis à la base des actionneur de manipulateurs manuels (quand  $\theta = \pi$ ). Pour ce mécanisme pantographique, la relation (1) peut être présentée par:

$$y_s = \left\{ \alpha \sin \varphi + \left( \sum_{i=1}^4 m_i - \beta \right) e \right\} / \sum_{i=1}^4 m_i,$$

où

$$\begin{aligned}\alpha &= m_1r_1 + m_{2E}l_1 + m_3r_3 + m_{4D}(l_1 + l_3); \\ \beta &= m_2(l_2 - r_2)/l_2 + m_4r_4/l_2 + m_3.\end{aligned}$$

Dans ce cas, pour l'équilibrage de l'actionneur du manipulateur, il est nécessaire que la condition  $\alpha = 0$  soit garantie, ce qui est assuré par la mise en place d'un contrepoids.

Une autre exigence présentée aux manipulateurs manuels est l'invariabilité de la charge sur le système moteur, exercée par les poids des éléments de l'actionneur du manipulateur. Celle-ci doit être indépendante de la position de la charge dans la zone de travail. Dans ce cas avec la condition  $\alpha = 0$ , il conviendra de remplir aussi la condition

$$\beta = \sum_{i=1}^4 m_i \left( \text{puisque } x_s = (\alpha \cos \varphi + \beta x) / \sum_{i=1}^4 m_i \right).$$

Lorsque ces conditions sont assurées, le centre des masses de l'actionneur du manipulateur coïncide avec le centre de l'articulation B (fig. 1). Lors du mouvement vertical du poids, l'effort exercé sur le système moteur est proportionnel à la grandeur de ce poids. Le coefficient de proportionnalité est égal au rapport de similitude du mécanisme pantographique.

Lors de l'équilibrage du système et à condition qu'une charge constante sur le moteur soit assurée par un seul contrepoids, il est convenable de déterminer la masse  $m_1$  de l'élément 1 (v. fig. 1) d'après la condition

$$\beta = \sum_{i=1}^4 m_i$$

et la distance  $r_1$  (coordonnée du centre des masses  $S_1$ ) de la condition  $\alpha = 0$ .

### 3. APPLICATION PRATIQUE

Le tableau (1) décrit les schémas cinématiques des manipulateurs manuels les plus utilisés. Il donne aussi les formules de calcul pour leur équilibrage. L'analyse des forces des différentes méthodes d'équilibrage montre que celui-ci devient optimal lorsque le centre des masses de l'actionneur coïncide avec le centre de l'articulation A liée avec le vérin. Parce que, dans ce cas, la réaction obtenue dans l'articulation d'appui B est la plus faible, ce qui apporte comme conséquence une réduction de l'effort manuel exercé par l'opérateur. Cependant, l'installation de deux contrepoids n'est pas souhaitable. C'est la raison pour laquelle, il est plus convenable d'utiliser un autre mécanisme pantographique tel que celui dont le schéma cinématique est illustré par la

Tableau 1. Schémas cinématiques des manipulateurs les plus répandus et les formules de calculs pour leur équilibrage

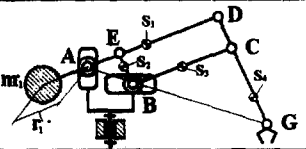
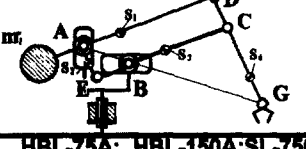
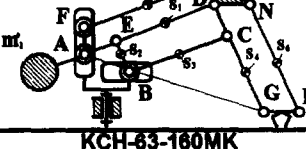
| SCHEMA CINEMATIQUE                                                                | DESIGNATIONS                                                                                                                       | FORMULES DE CALCULS                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | $BC=ED=a; BE=DC=b_1;$<br>$AE=a_1; CG=b; AS_1=r_1;$<br>$ES_2=r_2; BS_3=r_3; DS_4=r_4.$                                              | $m_1^*=m_2(1-r_2/b_1)+m_4(1-r_4/b_1);$<br>$r_1^*=1/m_1^*(m_2a_1+m_3r_3+m_4(a_1+a_1)-m_2r_2a_1/b_1-m_4r_4a_1/b_1).$                                                   |
| KCH-160M1; MBR-63;120;250                                                         |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                      |
|  | $AE=DC=b_1; EB=a_1; BC=a;$<br>$CG=b; AD=a+a_1; AS_1=r_1;$<br>$AS_2=r_2; BS_3=r_3; DS_4=r_4.$                                       | $m_1^*=m_2(1-r_2/b_1)+m_4(1-r_4/b_1);$<br>$r_1^*=1/m_1^*(m_2a_1+m_4(a+a_1)-m_2r_2a_1/b_1-m_4r_4a_1/b_1).$                                                            |
| HBL-75A; HBL-150A;SL-750                                                          |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                      |
|  | $ED=BC=a; BE=DC=b_1; AE=a_1;$<br>$CG=b; FH=a+a_1; NL=b+b_1;$<br>$AS_1=r_1; ES_2=r_2; BS_3=r_3;$<br>$DS_4=r_4; FS_5=r_5; NS_6=r_6.$ | $m_1^*=m_2(1-r_2/b_1)+m_4(1-r_4/b_1)+$<br>$+m_6(1-r_6/b_1);$<br>$r_1^*=1/m_1^*(m_2a_1+m_3r_3+m_4(a_1+a_1)-m_2r_2a_1/b_1-m_4r_4a_1/b_1+$<br>$+m_5r_5-m_6r_6a_1/b_1).$ |
| KCH-63-160MK                                                                      |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                      |

fig. 3. Ce schéma permet, par l'installation d'un seul contrepois sur l'élément 2, de faire coïncider le centre des masses de l'actionneur avec le centre de l'articulation A.

La fig. 4 montre un schéma du MM sans système moteur conçu pour assister une machine-outil. Elle doit assurer la production d'un lot de pièces à usiner. Après avoir terminé l'usinage sur la machine-outil, l'opérateur fait descendre le dispositif de serrage (le préhenseur de la pièce ébauchée 12, duquel est chargé). A l'aide du préhenseur 13, l'opérateur extrait la pièce usinée du mandrin. Au cours de cette opération et par suite de l'action commune du poids de la pièce ébauchée et de la pièce usinée, le bras se déséquilibre et s'abaisse jusqu'à la position fixée par la butée (montée dans la rainure du mouvement vertical et non montrée sur la fig. 4). Ici, l'axe de serrage de la pièce ébauchée se met en coïncidence avec l'axe du mandrin. Dans cette position, l'opérateur monte la pièce ébauchée dans le mandrin, à la suite de quoi, l'équilibrage du manipulateur se rétablit. Il amène manuellement l'actionneur au dispositif 14 pour le chargement et le déchargement du manipulateur (fig. 5). Pour approcher l'actionneur au dispositif 14, il faut pivoter ce premier de 90° et l'abaisser. Avec l'abaissement de l'organe de préhension, son élément 18 déplace l'intercepteur 17. Par un plan incliné, la pièce ébauchée est amenée au préhenseur 12. Par suite de l'action commune des poids

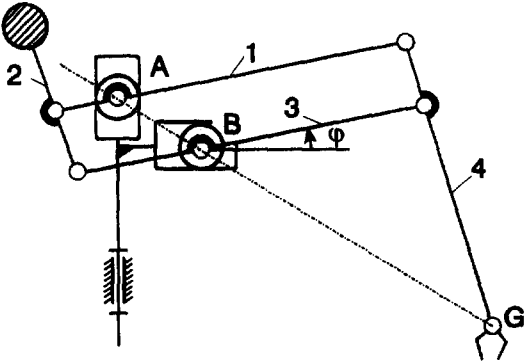


Fig. 3. Schéma du mécanisme pantographique assurant un équilibrage optimal du MM par l'installation d'un contrepois.

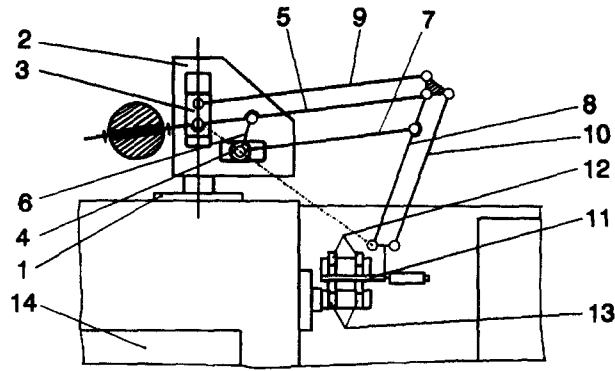


Fig. 4. Manipulateur manuel sans système-moteur.

de la pièce ébauchée et de la pièce usinée, l'actionneur tombe en déséquilibre, l'organe de préhension lui-même descend jusqu'au contact des mâchoires, délaissant ainsi la pièce quelque peu plus haut au-dessus de l'auge de réception 16 pour les pièces et rétablissant ainsi l'état d'équilibre du manipulateur.

L'opérateur remonte ensuite manuellement l'organe de préhension et le dispose sur le mandrin. Après avoir terminé le processus d'usinage, le cycle se répète.

L'exclusion du système moteur du manipulateur est rendu possible grâce à une méthode d'équilibrage suivant laquelle, les paramètres de l'actionneur du manipulateur se déterminent à partir des conditions d'équilibrage des poids des éléments de l'actionneur avec le poids de "l'objet conventionnel manipulé":

$$m_5 r_5 + m_6 r_6 + m_8 L_9 + m_7 r_7 + m_9 r_9 + m L_9 - m_6 r_6 (L_9 - L_7) /$$

$$L_6 - m_8 r_8 (L_9 - L_7) / L_6 - m_{10} r_{10} (L_9 - L_7) / L_6 - m L_9 (L_9 - L_7) / L_6 = 0;$$

$$(m_6 r_6 + m_8 r_8 + m_{10} r_{10} + m L_8) / L_6 = \sum_{i=5}^{13} m_i + m - m_7,$$

où  $m = 0.5(m_p + m_{eb})$  est la masse de "l'objet conventionnel manipulé" égal à la moitié de la somme des masses de la pièce usinée ( $m_p$ ) et de la pièce ébauchée ( $m_{eb}$ );  $m_i$ ,  $L_i$  et  $r_i$  sont respectivement la masse, la longueur et la distance du  $i$ -ème élément ( $i = 5, \dots, 10$ ) par rapport au centre de l'articulation de gauche ( $i = 5, 7, 9$ ) ou supérieure ( $i = 6, 8, 10$ ) (v. fig 4).

Ces relations décrivent la condition d'autoéquilibrage du système "bras-objet manipulé" qui, au cas où elle serait accomplie, il est possible d'effectuer manuellement le déplacement de l'objet manipulé aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical.

Ainsi, en surmontant seulement une petite force non équilibrée qui est égale en valeur à 5-8% du poids de l'objet manipulé, l'opérateur aura la possibilité de charger et de décharger la machine-outil.

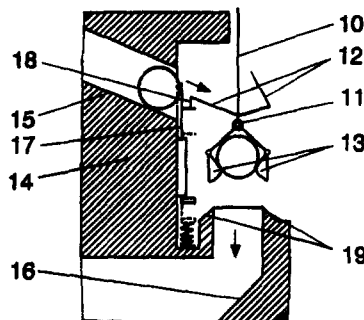


Fig. 5. Dispositif chargement-déchargement du manipulateur.

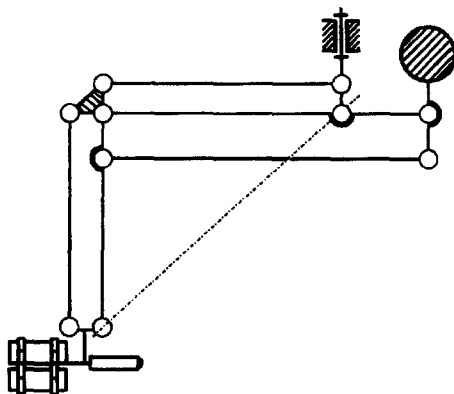


Fig. 6. Manipulateur manuel sans système-moteur contenant seulement des couples rotations.

L'application pratique montre que, le fonctionnement du manipulateur manuel est plus aisé lorsque l'actionneur est constitué seulement par des couples de rotation. Dans ce cas, les forces de friction sont les plus faibles et, par conséquent, l'effort manuel exercé par l'opérateur est moindre. Un schéma cinématique de tel manipulateur manuel est donné sur la fig. 6.

#### 4. CONCLUSION

L'analyse des travaux consacrés à l'étude des manipulateurs manuels montre qu'il n'existe pas de méthode unifiée pour la solution des problèmes de leurs équilibrage et de recommandations pour une application plus rationnelle des résultats des études menées dans ce domaine. La méthode proposée est basée sur l'étude du mouvement du centre général des masses des éléments mobiles de l'actionneur du manipulateur et donne la possibilité de créer de nouveaux manipulateurs manuels sans système-moteur, permettant d'effectuer manuellement le mouvement de l'objet manipulé aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. L'exclusion du système-moteur du manipulateur est rendue possible grâce à un moyen d'équilibrage non-traditionnel suivant lequel les paramètres de l'actionneur sont déterminés à partir des conditions de l'équilibrage des poids des éléments de l'actionneur avec le poids de "l'objet conventionnel manipulé" qui est soit la pièce ébouchée soit la pièce usinée. Sur la base de cette méthode sont proposées les schémas cinématique des manipulateurs manuels plus optimales.

#### REFERENCES

1. Hank, F. *Mashinenmarkt.*, 1976, **82**, 1376.
2. Krsnak, H. G. and Howe, M. J., *Fördern und Heben*, 1976, **15**,(26), 25.
3. Mechanisieren von Handhabungen mit Synchon-Manipulatoren. *Maschinenmarkt*, 1978, **84**(41), 809.
4. Belyanine, P. N., Manipulateurs équilibrés *Construction des machines*, Moscou, 1988, p. 236.
5. Popov, M. V., and Turine, V. N., *Ouvrages scientifiques de VZMI*, Moscou, 1980, 8.
6. Popov, M.V., *Construction des mécanismes et dynamique des machines*, Moscou, 1986, 111.
7. Shin, E. and Streit, D. A., *Mech. Mach. Theory*, 1991, **26**(7), 645.

#### BALANCING OF MANUAL MANIPULATORS

**Abstract**—This paper deals with a method suggested for balancing hand-operated manipulators of the pantograph type. The method is based upon a study concerning the motion of the general center of masses of manipulator actuator moving links. The conditions for balancing hand-operated manipulators are formulated therewith. The use of the method makes possible to develop radically new driveless hand-operated manipulators which permit to displace manually the handled object both in the horizontal and in the vertical plane. The exclusion of the manipulator drive becomes possible due to a non-conventional mode of balancing according to which the parameters of the manipulator actuator are determined following the conditions on balancing the weights of actuator links in conjunction with the weight of the "conventional handled object". This latter may be either a workpiece or a finished part. New and more efficient kinematic schemes of hand-operated manipulators are suggested on the basis of this method.