Liaisons cinématiques intelligentes

Marin Ené, dr. ing.

Professeur au Département des Sciences Appliquées,
l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue,
445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4, Canada
marin.ene@uqat.ca

Résumé

Dans cet article on se propose de développer le concept de liaison intelligente qui réunit plusieurs caractéristiques jusqu'ici considérées comme indépendantes à savoir l'aspect :

- mécanique :
 - structomatique (la topologie du réseau mécanique),
 - cinématique virtuelle,
 - cinéostatique,
 - dynamique,
- énergétique et
- informatique (collecte d'informations à travers les senseurs, logique de commande).

Les liaisons intelligentes conduisent, en relation avec le principe structomatique de construction de modules élémentaires, à la notion de module intelligent et à travers le principe général de formation de mécanismes à la notion de mécanisme intelligent.

1. Introduction

La machine, MI, prise comme unité indépendante (c'est à dire sans considérer l'interaction avec le milieu, donc, machine « nouveau-née » ou Machine Initiale), est construite d'après une formule [12,14,25] qui lie, suivant les lois $\oplus_i$, les sous systèmes mécaniques (M), d'actionnement (A), de mesure (T), et de contrôle (C) :

$$MI = ((M \oplus_a A) \oplus_t T) \oplus_c C$$

La formule morphologique qui peut être utilisée pour des fins de classification, nous montre que le système mécanique est la partie sine qua non de MI : les actionneurs, les senseurs et le système de commande ne servent qu'à améliorer les propriétés du système mécanique. Dans cette optique, la conséquence naturelle serait de mettre tous les efforts pour développer le système M.

Cependant, en regardant la littérature de spécialité et les produits sur le marché [27,1], on remarque depuis quelques décennies, une nouvelle direction dans la construction des machines qui consiste dans l'intégration des composantes électriques, électroniques, hydrauliques, informatiques, etc. L'apparition de la mécatronique vient justement de qualifier ce phénomène. Dans ces conditions, les mécaniciens ne peuvent pas éluder la tendance, continuer à composer seulement avec les concepts purement mécaniques et s'accrocher aux bonnes vieilles méthodes sans risquer d'être dépassés. En effet, l'histoire nous montre que la mécatronique n'est pas l'invention des mécaniciens mais des électriciens plus fonceurs, plus ouverts aux nouvelles idées (l'inertie électrique est plus petite que l'inertie mécanique!).

C'est dans ce sens qu'on va essayer de présenter des concepts mécaniques plus appropriés aux approches intégrées.

La démarche proposée repose sur le principe général de formation des mécanismes [4,5,10,12,22] : les mécanismes sont formés à partir du zéropôle par addition, en série ou en parallèle des groupes modulaires élémentaires (passifs ou actifs). La façon dont les modules sont enchaînés se concrétise dans une formule unique qui décrit la structure du mécanisme. Cette formule donne les informations suivantes :

- la voie à suivre pour un montage rationnel;
- les éléments nécessaires à une classification structomatique;
- le chemin parcouru par les informations de mouvement (de position, de vitesse, d'accélération, de suraccélération (jerk, pink [21]));
- le tracé suivi par les forces à travers les éléments et les liaisons cinématiques;
- le nombre minimal des liaisons actives (le nombre des moteurs);

Au principe général de formation des mécanismes on va ajouter le côté informatique qui va nous renseigner sur :

- le nombre minimal de senseurs pour un contrôle non redondant;

- le nombre minimal des programmes informatiques indépendants pour le calcul de la structure.

2. La liaison intelligente

Les éléments cinématiques qui rentrent dans la construction du système M des MI sont en relation les uns avec les autres par des zones de contact et on nomme un système binaire formé de deux éléments cinématiques voisins, couple cinématique ou liaison cinématique. Dans la théorie classique des mécanismes [17,18,19,8] on décrit les liaisons cinématiques passives (LCP) et les liaisons cinématiques actives (ou motrices) (LCA) [16,2,3,11,20,]. Ces notions sont appropriées pour la description d'un mécanisme tant et aussi longtemps que le système mécanique garde son individualité; aussitôt que les systèmes mécaniques sont intimement collés aux systèmes électriques ou autres, la décomposition perd son intérêt parce que les informations fournies sont partielles et d'autres concepts, plus appropriés, doivent être proposés pour décrire plus fidèlement la réalité. Ainsi, on est amené à considérer la notion de liaison intelligente qui donne une description des phénomènes mécaniques, électriques et logiques qui entourent la zone d'interaction d'un système binaire fait d'éléments rigides qui se trouvent en mouvement relatif.

La définition de la liaison cinématique intelligente passive (LCIP) complète la définition du couple cinématique passif dans ce sens que le torseur sthénique τ_{ij} [16] associé aux efforts transmissibles entre les corps i et j ne provient pas du contact mécanique; le contact est moyenné par un autre milieu matériel (fluide par exemple) ou par un champ (magnétique ou électromagnétique). De cette façon, puisque les déplacements relatifs du corps i par rapport au corps j sont des déplacements locaux non nuls, le moment des torseurs sthénique et bercique est non nul. À la rigueur, la liaison intelligente passive n'est pas une liaison parfaite; elle nécessite un apport d'énergie externe pour réaliser la transmissibilité des efforts, un système sensoriel pour mesurer les paramètres relatifs et un système de commande pour maîtriser le petit mouvement relatif.

Pour ce qui est de la liaison cinématique intelligente active (LCIA) le torseur sthénique n'est pas entièrement local (il présente aussi une ou des composantes globales). Le torseur des déplacements comporte une partie bercique et une partie globale. Donc, une LCIA est une LCIP avec des mouvements globaux. Aussi bien on peut dire que LCIP est une LCIA qui présente seulement des mouvements locaux.

Ces notions ne sont pas entièrement nouvelles dans le domaine technique : on retrouve des rudiments d'une LCIP dans un palier magnétique, un palier en

régime hydrodynamique ou dans les paliers hydrostatiques à air [Spinnler] et par conséquent une liaison active qui présente une de ces caractéristiques est une LCIA rudimentaire. Ce qui est nouveau dans cette approche c'est l'introduction de la programmation de ces actions d'intermédiation ce qui ajoute un côté informatique dédié au processus complexe qui gère la transmission des efforts entre les extrémités de deux éléments cinématiques. En effet, pour le fonctionnement d'un palier en régime hydrodynamique on n'a pas besoin de contrôler le jeu minimal entre tourillon et coussinet à moins d'une situation exceptionnelle; le processus est automatique puisque naturel. Par contre, pour les paliers magnétiques [27] utilisés dans les machines à rectifier, on a besoin d'une électronique de commande qui permet la réalisation d'une rigidité dynamique réglable, d'une position de l'axe de rotation réglable, d'un amortissement réglable utile pour la traversée des domaines de résonance du rotor, etc., donc, on a affaire avec une LCI. Dans le monde biologique, les LCI sont courantes, si bien que leur commande a été confiée à une partie distincte du système nerveux.

Dans la structomatique des mécanismes parfaits [28,25], les LCP et LCA entrent dans la composition des modules élémentaires. Ces modules sont définis comme étant des chaînes cinématiques ouvertes de mobilité M , qui provient des chaînes cinématiques fermées par l'extraction d'un élément considéré fixe (le bâti) et qui ne sont pas décomposables en modules plus simples. Les modules élémentaires avec $M = 0$ sont les modules passifs tandis que les modules avec $M > 0$ sont des modules actifs.

Dans la structomatique des mécanismes intelligents où à la place de LCP et LCA on a au moins une LCIP ou une LCIA les modules vont hériter de l'intelligence de ces composantes.

3. Modules et mécanismes intelligents

Du point de vue calcul cinématique, les modules structomatiques (passifs ou actifs) sont décrits par des systèmes d'équations non linéaires. Pour les mécanismes complexes, la matrice jacobienne du système d'équations des positions, M_{sys} , peut être mise sous la forme diagonale par des transformations élémentaires équivalentes, les éléments non nuls étant des matrices carrées M_i .

$$M_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_n \end{bmatrix}$$

Cette partition est possible vu la propriété des chaînes cinématiques d'être décomposables en multipôles [22] qui sont des unités (des briques) pour la formation des mécanismes. Chaque multipôle reçoit les informations de mouvement par des pôles d'entrée, les transforme conformément à la matrice de transmission propre et les livre aux pôles de sortie. Ainsi, on peut mettre en évidence une formule de structure qui caractérise univoquement un mécanisme donné [13]. Chaque unité de construction peut être munie d'un programme informatique pour la gérance des informations cinématiques (positions, vitesse, accélérations et d'autres dérivées d'ordre supérieur par rapport au temps) et cinéto-statiques (efforts dans les liaisons).

Pour ce qui est de la dynamique du mécanisme les calculs ne peuvent pas être effectués par module; il faut plutôt prendre en considération l'ensemble. Mais, ici encore, la préparation des coefficients variables des équations différentielles de mouvement [9,23,24,26] fait appel au calcul cinématique virtuelle (le calcul des vitesses, accélérations pour des valeurs arbitraires des vitesses et des accélérations des liaisons motrices).

L'introduction de la notion de liaison intelligente complique de beaucoup les calculs. En effet, à la différence des LCP et de LCA, les LCIP et les LCIA exigent des préoccupations supplémentaires pour les mouvements locaux avant de passer à un module suivant. Ces calculs demandent l'analyse cinématique, cinéto-statique et dynamique afin d'élaborer la commande pour les paramètres des éléments intermédiaires (pressions, intensité du champs électrique, intensité du intensité du champs magnétique, etc.) dans les zones de contact. Les calculs sont itératifs et de plus, les programmes utilisés pour les modules classiques sont réutilisables.

4 Applications

Considérons un mécanisme complexe avec trois degrés de mobilité dont le schéma cinématique est présenté figure 1 [6]. Le schéma structomatique nous permet la décomposition en modules qui sont présentés dans le schéma multipolaire (schéma formé avec des blocs) assemblés d'après la formule multipolaire où les termes sont :

- Z(0) – le bâti qui est le module initial nommé zéropôle,
- MTR(4,3,1,5,) – une triade motrice (le moteur est le vérin E entre les éléments 3 et 4),
- MD(11, 10, 9) – une dyade motrice (la liaison active est en P),

- TR(6,8,12, 7) – une triade (module passif),
- ME(13) – un motoélément de translation (élément moteur avec la liaison active en T).

Figure 1. Schéma structomatique d'un mécanisme avec liaisons parfaites

A chaque module excepté le zéropôle Z(0), on a associé des routines de calcul :

- une routine pour le calcul des positions, vitesses et accélérations,
- une routine pour le calcul des réactions dans les liaisons.

Pour le calcul des positions soient $f(x(t), \alpha(t))$ les fonctions de positions de variables vectorielles $x(t)$ (vecteur des variables inconnues) et $\alpha(t)$ (vecteur qui contient des variables connues) à savoir :

$$\begin{aligned} f &= [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_i]^T \\ x &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i]^T \\ \alpha &= [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_c]^T \end{aligned}$$

Pour calculer les inconnues x_i , de l'équation vectorielle

$$f(x(t), \alpha(t)) = 0$$

on peut appliquer la méthode itérative Newton-Raphson exprimée par l'équation récurrente :

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{W}_{xk}^{-1} \mathbf{f}_k$$

où

$$\mathbf{W}_{xk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \end{bmatrix}_k$$

est la matrice jacobienne des inconnues (matrice carrée de dimension ixi).

Pour le calcul des vitesses on procède à la dérivation par rapport au temps, du système des équations de position. On obtient ainsi, le système d'équations linéaires en dx_i/dt :

$$\mathbf{W}_x \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} + \mathbf{W}_\alpha \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dots \\ \dot{\alpha}_c \end{bmatrix} = 0$$

où, la matrice $\mathbf{W}_\alpha$ des dimensions ixc est connue (dépend de $\mathbf{x}(t)$ et de $\alpha(t)$) et a la forme :

$$\mathbf{W}_\alpha = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_c} \end{bmatrix}$$

Le produit matriciel :

$$\mathbf{W}_\alpha \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dots \\ \dot{\alpha}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \end{bmatrix}$$

représente le terme libre du système d'équations des vitesses. Ceci nous amène à la solution du système d'équations de vitesse :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = -\mathbf{W}_x^{-1} \bullet \mathbf{W}_\alpha \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dots \\ \dot{\alpha}_c \end{bmatrix} = -\mathbf{W}_x^{-1} \bullet \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \end{bmatrix}$$

Le système d'équations d'accélération s'obtient par dérivation par rapport au temps du système d'équations de vitesses à savoir :

$$\mathbf{W}_x \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{W}}_x \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{W}}_\alpha \dot{\alpha} + \mathbf{W}_\alpha \ddot{\alpha} = 0$$

La solution est donc,

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{W}_x^{-1} (\dot{\mathbf{W}}_x \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{W}}_\alpha \dot{\alpha} + \mathbf{W}_\alpha \ddot{\alpha})$$

Pour ce qui est de suraccélération (jerks) par une nouvelle dérivation on obtient :

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{W}_x^{-1} (2\dot{\mathbf{W}}_x \ddot{\mathbf{x}} + 2\dot{\mathbf{W}}_\alpha \ddot{\alpha} + \ddot{\mathbf{W}}_x \dot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{W}}_\alpha \dot{\alpha} + \mathbf{W}_\alpha \ddot{\alpha})$$

Pour les routines de cinétostatique on applique les équations d'équilibre statique aux modules tout en considérant les forces d'inertie comme forces appliquées.

Le programme principal pour l'analyse du mécanisme est structuré comme suit :

- la partie cinématique formée en appelant les routines associées aux modules dans le sens de la relation multipolaire c'est-à-dire de Z vers ME,
- la partie cinétostatique formée en ajoutant au programme de cinématique les routines pour le calcul des réactions, appelées dans le sens exactement inverse c'est-à-dire de ME vers Z,
- la partie dynamique obtenue en intégrant le système des équations différentielles de Lagrange dont les coefficients sont calculés en reprenant l'analyse cinématique pour des valeurs particulières des vitesses et des accélérations généralisées [26,24].

Figure 2. Schéma structomatique d'un mécanisme avec liaisons intelligentes

Cet algorithme est valable en considérant les liaisons parfaites (LCP ou LCA). Si le mécanisme contient des liaisons intelligentes, le même programme peut être recyclé pour donner les conditions initiales des mouvements locaux dans les pôles respectifs. Le schéma structomatique devient alors comme montré sur

figure 2 avec la relation multipolaire qui prend l'indice I pour marquer qu'il s'agit des liaisons intelligentes.

5. Conclusion

Des moyens démesurés ont été déployés pour le développement des parties C et, dans une ordre décroissante, des ressources ont été alloué aux systèmes T, A et en dernier lieu, contre toute logique, au système M. Ceci a eu pour effet de rendre moins attractif le domaine mécanique et par voie de conséquence de tarder ou carrément faire impossible des progrès remarquables dans la conception des mécanismes. Dans ce sens, l'article se veut une contribution au développement des méthodes modernes dans l'analyse des interactions physiques (mécaniques ou autres) dans les mécanismes complexes afin d'unifier les approches électriques, informatiques et mécaniques. Ces préoccupations visent à créer plus d'attraits pour les recherches en mécanique afin de séduire les étudiants à développer des systèmes nouveaux par l'intégration de l'informatique, de l'électrique et du mécanique dans le paradigme de liaison cinématique intelligente.

6. Bibliographie

1. * * * - SEW Eurodrive. Le motoréducteur intelligent, www.seweurodrive.com
2. Agati P., Rossetto M. - Liaisons et mécanismes, Dunod, Paris, 1994.
3. Angeles J. - Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods, and Algorithms, Springer, 1997.
4. Artobolevski, I. - Théorie des mécanismes et des machines, Éditions Mir, Moscou, 1977.
5. Assur L.P. - L'étude des mécanismes plans avec barres articulées (à liaisons cinématiques inférieures), dans le Bulletin de l'Institut Polytechnique de Pétrograd, 1913-1918.
6. Chabot J. - Banc d'essai pour les mécanismes hydrauliques des machines forestières, minières et agricoles, rapport dans le cadre du projet électromécanique intermédiaire, UQAT, avril 2002.
7. Chavand F., Colle E. - Perception de l'environnement en robotique, Éditions Hermes, Paris, 1998.
8. Chedmail P., Dombre E., Wenger Ph. - La CAO en robotique. Outils et méthodologie. Éditions Hermes, Paris, 1998.
9. Dranga M., Manolescu N.I. - Matrix Equation for the Motion of Planar Mechanisms with one Degree of Mobility using Transmission Functions, in Mechanisms and Machine Theory, 1977, vol 12, pp. 165-172.
10. Duca C., Simionescu I. - Un principe général de formation des mécanismes, dans Études et recherches de mécanique appliquée, Bucarest 1973.
11. Duditza F., Diaconescu D. - L'optimisation structurale des mécanismes, Editura Tehnica, Bucarest, 1987.
12. Ene M. - L'analyse et la synthèse des mécanismes manipulateurs à 5 degrés de mobilité, Thèse, Bucarest 1985.
13. Ene M., Simionescu I., Moise V. - Représentations numériques dans la structomatique des mécanismes, The Fifth IFToMM International Symposium on Linkages and Computer Aided Design Methods, Bucarest 1989 (en roumain).
14. Ene, M., Grecu, E. - Modules cinématiques pour la simulation dynamique des robots parallèles, dans 5^e congrès franco-japonais & 3^e congrès Europe-Asie de Mecatronique, Besançon, 9-11 octobre 2001.
15. Khalil W., Dombre E. - Modélisation, identification et commande des robots, Hermes, Paris 1999.
16. Leroy A. - Théorie des mécanismes parfaits. Outil de conceptique, Technique et documentation, Paris, 1998.
17. Lur'e, L. - Mécanique analytique, Masson et C^{ie}, Paris 1968.
18. Manolescu N.I. - For a United Point of View in the Study of the Structural Analysis of Kinematic Chains and Mechanisms, Journal of Mechanisms, vol. 3, no 3 pages 149-169, Pergamon Press, 1968.
19. Merlet J.-P. - Les robots parallèles, Hermes, Paris 1997.
20. Moise V., Simionescu I., Ene M., Iaciu G. - L'analyse des mécanismes plans à membrures (en roumain), Éditions Bren, Bucarest, 2001.

21. Norton L.R. – Design of Machinery. An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, 2^e edition, WCB McGraw-Hill, 1999.
22. Pelecudi Chr. – La précision des mécanismes (en roumain), Éditions de l'Académie Roumaine, Bucarest, 1975.
23. Pelecudi Chr., Dranga M. – Dynamique des machines (en roumain), Institut Polytechnique de Bucarest, 1980.
24. Pelecudi Chr., Simionescu I., Ene M. – La dynamique des robots bimobiles, Le Bulletin de l'Institut Polytechnique de Bucarest, Tome XLII – 1981, no 4, pages 74-77.
25. Pelecudi Chr., Simionescu I., Ene M., Moise V., Candrea A. – Problemes de mécanismes, EDP, 1982 (en roumain).
26. Simionescu I., Moise V. – Mécanismes (en roumain), Éditions Tehnica, Bucarest 1999.
27. Spinnler G. – Conception des machines. Principes et applications, vol. 1, 2, 3. Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997, 1998.
28. Tollenaere M. – Conception de produits mécaniques, Hermes, Paris, 1998.