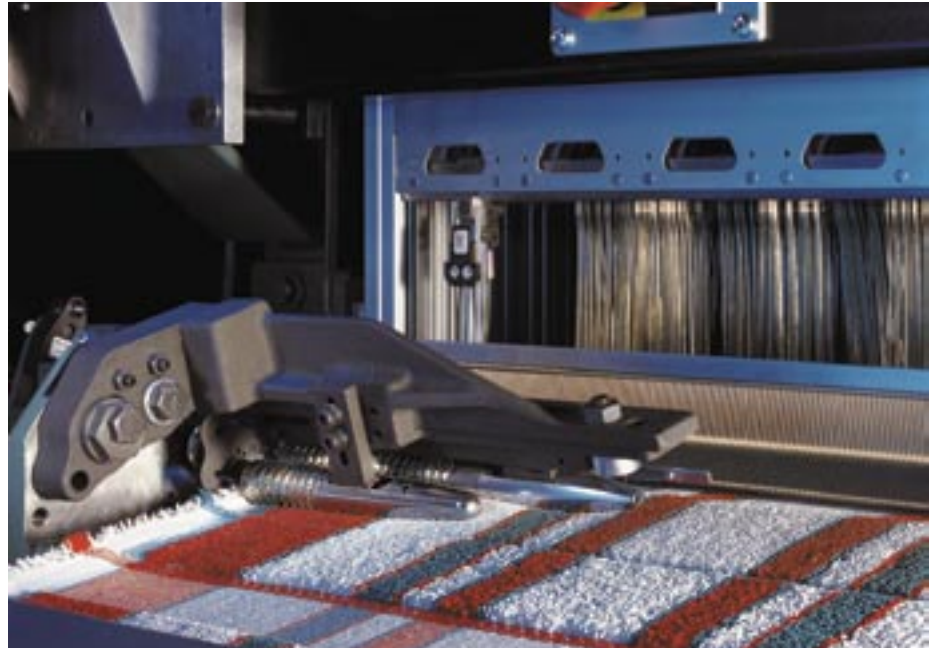


Les ingénieurs sont souvent surpris d'apprendre que le terme mécatronique date de près de 40 ans. Ce terme a été utilisé pour la première fois en 1969 par un ingénieur de la société Yaskawa, Tetsuro Mori, pour décrire un système composé d'éléments mécaniques et électriques et contrôlé par un système embarqué. De nos jours, il est rare de trouver des dispositifs électromécaniques ne contenant aucun système embarqué d'un type ou d'un autre. L'apport intelligent du système embarqué assure une amélioration des performances, une réduction de la consommation d'énergie,

une meilleure fiabilité et un fonctionnement plus sûr, toutes caractéristiques distinctives génératrices de valeur ajoutée pour les équipements.



Dossier: Conception Assistée par Ordinateur

Conception par modélisation

Les défis liés au développement des systèmes mécatroniques

par Tony Lennon et Paul Lambrechts,
The MathWorks

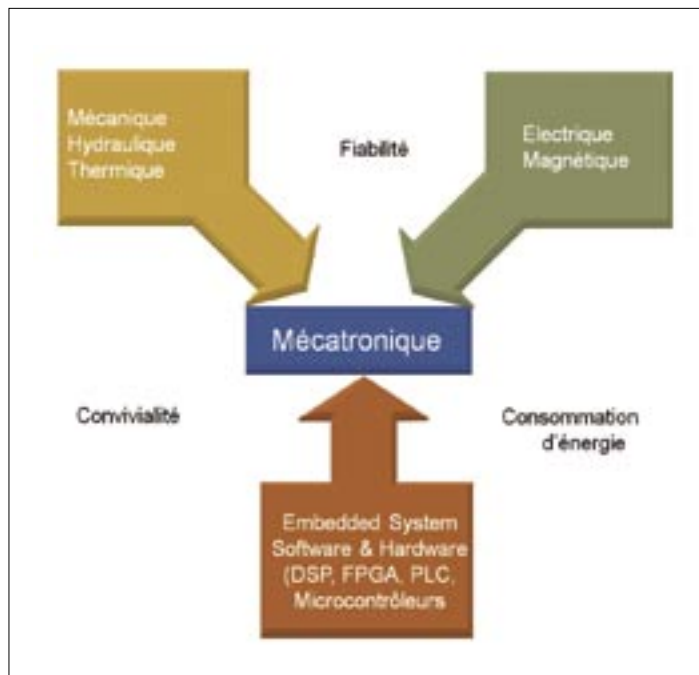
Les avantages offerts par un système embarqué ont leur prix. Puisque les systèmes mécatroniques profitent de microprocesseurs plus puissants qui fournissent l'intelligence des systèmes embarqués, l'interaction entre le matériel et le logiciel devient plus complexe. La gestion de cette complexité peut se révéler ardue pour les équipes d'ingénieurs matériel et logiciel qui définissent les exigences, décrivent les problèmes, et testent et mettent en œuvre les solutions de différentes manières. En outre, les ingénieurs doivent concevoir des stratégies de contrôle en boucle fermée afin de compenser les interactions électromécaniques et les perturbations extérieures, et d'incorporer un contrôle de surveillance en boucle ouverte pour les exigences opérationnelles, par exemple, le démarrage et l'arrêt, la sécurité du personnel et de l'équipement ou la détection et la correction des défaillances.

Dans la plupart des approches traditionnelles de la conception, les ingénieurs testent les logiciels sur des prototypes matériels et abordent la validation des logiciels à un stade très avancé

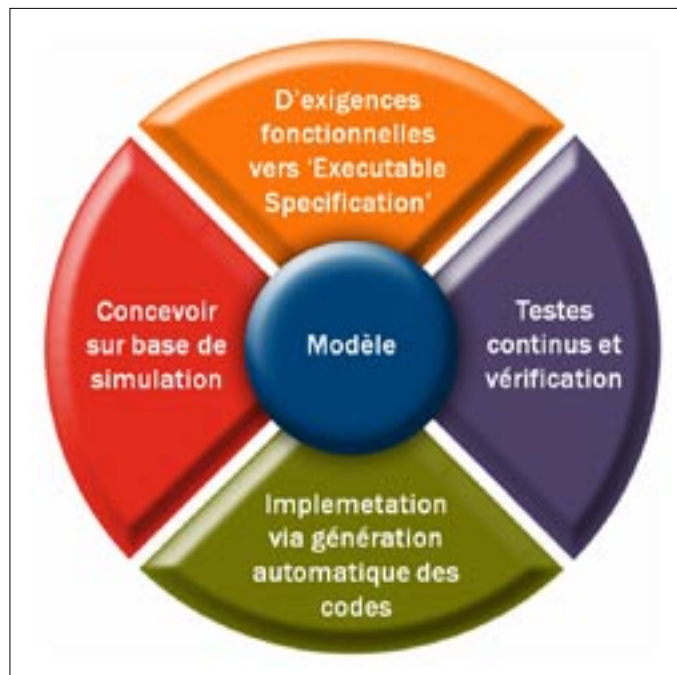
du processus de développement. Les erreurs découvertes alors dans le matériel ou le logiciel entraînent des retards coûteux et il faut parfois beaucoup de temps pour remonter à leur cause originelle. Les erreurs liées à des demandes incomplètes, incorrectes ou conflictuelles peuvent même exiger une refonte complète de la conception.

La conception par modélisation simplifie le développement des systèmes mécatroniques en proposant aux différents métiers de l'ingénierie un environnement commun de conception et de communication. Elle étend le monde de l'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) en l'enrichissant d'une perspective supplémentaire sur la conception au niveau des systèmes. Tout comme la conception assistée par ordinateur (CAO) propose une description géométrique ou statique d'un équipement, la conception

Photo en haut: exemple d'un système mécatronique, conçu et construit par la société belge Picanol.



La mécatronique est une synergie de systèmes mécaniques et électriques contrôlés par un système embarqué.



La conception par modélisation met le modèle de niveau système au centre du processus de développement.

par modélisation incorpore la dynamique et les besoins en performances nécessaires à une description satisfaisante du système. Puisque cette approche est pilotée par le logiciel, les ingénieurs peuvent librement examiner des conceptions concurrentes et explorer de nouveaux concepts sans faire face à des coûts d'investissement en matériel extensifs. Les ingénieurs peuvent tester continuellement la conception au fur et à mesure de son évolution, la vérifier par rapport aux besoins et découvrir les erreurs plus tôt dans le processus de développement, lorsque celles-ci sont plus aisées et moins coûteuses à corriger. De plus, la conception par modélisation automatise la génération de code pour le système embarqué en éliminant la nécessité d'écrire manuellement les algorithmes de contrôle en boucle ouverte et fermée.

La conception par modélisation utilise un modèle de niveau système qui définit une spécification exécutable en décrivant le comportement naturel et contrôlé de l'équipement sous une forme mathématique unique. Les ingénieurs peuvent exécuter le modèle en simulant la dynamique et les performances réelles du système. Le modèle spécifie une définition mathématique non ambiguë des performances attendues du système mécatronique. En tant que spécification exécutable, le modèle de niveau système présente un avantage incontestable sur les documents écrits, lesquels, puisqu'étant sujets à interprétation, peuvent mener à des besoins manquants, redondants ou en conflit avec d'autres.

Les besoins écrits existeront toujours mais les ingénieurs peuvent lier leurs formats électroniques au modèle de niveau système et aider

à établir le respect des normes telles les normes ISO 9001 ou IEC 61508. Le suivi des besoins depuis les spécifications écrites jusqu'au modèle de niveau système clarifie l'interprétation du besoin par l'ingénieur. Les liens électroniques entre les besoins et le modèle permettent aux ingénieurs de connecter les critères de test aux cas de test utilisés tout au long du processus de développement.

1. Développement du modèle 'système'

Un schéma fonctionnel est une approche naturelle pour l'expression d'un modèle de niveau système (figure 1). Le modèle contient des entrées, c'est-à-dire des signaux fournis par des agences externes et des sorties, soit des mesures de ce que le système fait en réalité. Les entrées et les sorties représentent des valeurs réelles telles que la tension, la température et le pH.

A l'intérieur du modèle, les blocs représentent des opérations mathématiques entre les signaux en entrée et en sortie du modèle. Certains blocs, appelés procédé ou processus, représentent le comportement naturel du système mécatronique. Par exemple, le modèle peut contenir un bloc représentant un moteur. Le modèle mathématique du moteur peut être assez simple, prenant seulement une tension d'entrée et la convertissant en couple de sortie. La complexité du modèle de moteur peut être augmentée en ajoutant davantage d'entrées, telles que le bruit

dans la tension, ou en ajoutant des paramètres, tels que la température et les effets de saturation magnétique. Un bloc unique ou un groupe de blocs, des signaux de filtrage et de traitement basés sur des erreurs de sortie ou des événements survenant dans le modèle peuvent représenter la compensation ou le contrôle dans le système.

La base d'un modèle de niveau système est un modèle mathématique à paramètres groupés décrivant la physique du système. Les équations différentielles ordinaires (ODE) et les équations algébriques différentielles (DAE) expriment la relation entrée-sortie des systèmes mécatroniques. Dans l'exemple de moteur, une équation ODE décrit la relation entre la tension en entrée et le couple de sortie de l'axe. Les équations différentielles représentent, du point de vue du calcul automatique, une manière efficace de décrire les dynamiques groupées, par opposition à l'utilisation d'un outil de modélisation basée sur une équation différentielle partielle, comme une analyse par éléments finis (FEA). Un logiciel d'analyse par éléments finis pourrait être utilisé pour résoudre la répartition des contraintes créées par le couple à une rainure clé de l'axe du moteur.

L'utilisation d'équations ODE pour décrire le comportement au niveau du système d'un système mécatronique recourant à plusieurs métiers d'ingénierie ne va pas sans défis. Pour exprimer mathématiquement le comportement du système, vous devez connaître la physique qui le sous-tend. En mécatronique, la réalité est que tous les systèmes sont non-linéaires et vous devez tenir compte de l'hystérésis, des frottements et des effets thermiques observés dans l'équipement mécatronique réel.

2. Amélioration du modèle

Lorsque les mathématiques du système deviennent trop difficiles ou prennent trop de temps à développer, les ingénieurs peuvent avoir recours à d'autres méthodes de modélisation au niveau du système. Une méthode usuelle pour compléter une approche 'premiers principes' est la modélisation empirique pilotée par les données, telle que l'identification des systèmes ou les réseaux neuraux.

Ces méthodes de la boîte noire utilisent les données entrée-sortie mesurées pour construire des formes ODE linéaires ou non linéaires du comportement du système et les incorporer dans le modèle de niveau système. Ces méthodes ne permettent pas de comprendre complètement la physique du système mais elles peuvent résulter en descriptions correctes de la dynamique du système dans la zone des données de test. Les données mesurées peuvent également améliorer la précision du modèle mathématique de 'premiers principes' en utilisant des techniques d'estimation des paramètres. Cette modélisation 'boîte grise' a recours à des techniques d'optimisation pour ajuster les paramètres du modèle tels que le coefficient de frottement afin de faire correspondre la sortie du modèle aux données de test.

La conception par modélisation permet aux ingénieurs de commencer par un modèle de niveau système moins détaillé puis d'augmenter sa fidélité par incréments à mesure que le développement progresse. Un modèle de validation de principe représenté comme équation ODE d'ordre inférieur pourrait bien être suffisant initialement pour aider les ingénieurs à éliminer rapidement les concepts peu prometteurs. Dans le cas des idées plus robustes, ils peuvent améliorer la fidélité en incorporant des sous-composants acquis auprès de fournisseurs pour évaluer rapidement les meilleures combinaisons de composants. Les modèles évoluent en une combinaison de plusieurs domaines, fournis-



Un autre exemple d'une configuration mécatronique: une machine à coupe laser. de Gildemeister.

sant seulement les détails nécessaires pour assurer les performances dans les conditions de fonctionnement exprimées dans les documents de besoins.

La CAO rejoint la conception par modélisation quand les ingénieurs augmentent la fidélité du modèle en utilisant les propriétés de masse et d'inertie d'un système mécanique traduites depuis un fichier d'assemblage CAO à trois dimensions. Les ingénieurs peuvent remplacer les représentations mathématiques approximatives par des blocs représentant des corps et des éléments de transmission mécaniques traduits automatiquement depuis le fichier de CAO. Le développement des modèles de niveau système de mécanique complexe en est accéléré et, en outre, cette approche permet de s'assurer que les concepteurs du système et les ingénieurs mécaniques utilisent un comportement de modèle commun accepté par tous qui représentera le système mécatronique réel lorsqu'il sera construit.

3. Développement de la stratégie de contrôle

Une fois le comportement naturel du système décrit, l'étape suivante consiste à développer et évaluer une stratégie de contrôle qui peut incorporer de nombreux niveaux de contrôle en boucle ouverte et fermée au sein du système mécatronique. Le contrôle en boucle ouverte, qui comprend tous les contrôles d'interface, de mode, de logique et de surveillance, représente la façon dont les ingénieurs mettent en œuvre le fonctionnement sûr, la détection des défaillances et les fonctions de reprise. La complexité du contrôle en boucle fermée peut varier, allant d'algorithmes pour un compensateur proportionnel, intégral, dérivé (PID) de base à une mise en œuvre d'un contrôleur gaussien quadratique linéaire à plusieurs variables (LQG).

Le contrôle en boucle ouverte assure le contrôle de surveillance et le contrôle de mode au sein de l'équipement et gère l'interaction de l'opérateur avec l'équipement. Les concepteurs d'équipement utilisant des microprocesseurs plus puissants peuvent développer des interfaces utilisateur complexes qui donnent un meilleur contrôle sur le fonctionnement de l'équipement. Il en résulte que les développeurs peuvent créer des systèmes de plus en plus complexes dotés de fonction d'autodiagnostic, de détection des défaillances et d'arrêt de sécurité au sein de l'équipement. La conception par modélisation aide les ingénieurs à développer et tester le système de contrôle en boucle ouverte, qui devient de plus en plus complexe, par rapport au modèle de niveau système. La simulation permet de

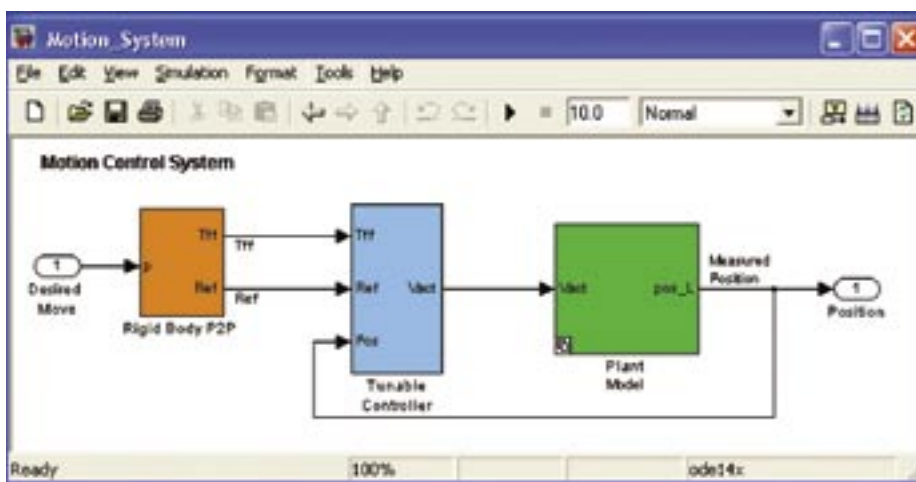


Figure 1. Un schéma fonctionnel donne une vue intuitive d'un modèle de niveau système.

commencer les tests très tôt dans le processus de conception afin d'améliorer l'ergonomie de l'équipement, de découvrir les scénarios qui pourraient l'endommager ou créer des conditions dangereuses.

Un système mécatronique peut utiliser plusieurs systèmes de contrôle en boucle fermée opérant dans une plage de conditions. L'utilisation d'un modèle de niveau système aide à concevoir et accorder les contrôleurs dans les boucles de contrôle ayant un comportement couplé. Le réglage des contrôleurs au sein du matériel est difficile et prend beaucoup de temps, et il aboutit souvent à désaccorder le système au-dessous des performances attendues pour éviter toute instabilité. Un modèle de niveau système permet aux ingénieurs d'analyser l'interaction des boucles de contrôle, de développer des stratégies de découplage et d'accorder les gains de compensateur en utilisant une variété de méthodes reposant sur des techniques directes et basées sur l'optimisation.

A ce stade, le modèle de niveau système révèle des instabilités dynamiques qu'il est soit physiquement, soit économiquement, impossible d'éliminer en utilisant des méthodes de compensation en boucle fermée. Le modèle facilite l'identification et le réglage des paramètres physiques tels que la masse, la longueur et la capacité, qui sont responsables de l'instabilité. Il en résulte que les problèmes peuvent être découverts pendant le stade moins onéreux de simulation par logiciel plutôt que pendant les tests de prototypes physiques.

La conception par modélisation aide les ingénieurs à effectuer des études de compromis portant sur les coûts au sein du système de contrôle. Le modèle de niveau système est un outil d'analyse permettant de décider si un capteur moins coûteux et ayant une plus grande tolérance fournira les niveaux de précision et de performance voulus.

Les ingénieurs peuvent évaluer pratiquement n'importe quel composant utilisé dans les systèmes mécatroniques du point de vue du coût par comparaison au retentissement sur les performances du système.

4. Elaboration pour le déploiement

Lorsque la stratégie de conception des contrôles a été développée et testée dans la simulation, les ingénieurs élaborent le modèle plus avant en vue de son déploiement. Le mot «déploiement» décrit la conversion des algorithmes de contrôle en code C, en langage de conception de matériel (HDL) ou en un des langages IEC 61131-3, tels que le texte structuré (ST), en vue de leur exécution sur un système en temps



Un système, conçu par la société japonaise Omron: une table de transfert.

réel. Ce processus consiste à convertir les algorithmes de contrôle depuis un format continu (analogique) vers un format discret (numérique), souvent à virgule fixe. Pendant les tests continus, les ingénieurs testent la forme numérique des algorithmes de contrôle en les comparant avec la forme continue du procédé pour déterminer si la conversion numérique affecte les performances souhaitées pour le système.

L'élaboration du modèle permet aux ingénieurs d'examiner d'autres aspects de la conversion en signaux numériques.

Les concepteurs du système modélisent les pilotes de périphériques entrée/sortie (E/S) et tous les convertisseurs A/N et N/A pour s'assurer qu'aucune corruption ou aucun alias des signaux ne surviendra lors de la mise en œuvre réelle du système. Les modèles mécatroniques utilisent souvent une combinaison de différents processeurs fonctionnant avec des vitesses et des taux d'échantillonnage différents. Le modèle de niveau système permet aux ingénieurs de simuler et tester différentes combinaisons pour évaluer les options de coûts et de mise en œuvre, telles que l'utilisation d'un réseau de portes programmable par l'utilisateur (FPGA) à la place d'un processeur de signaux numériques (DSP), ou des calculs en virgule fixe plutôt qu'en virgule flottante.

5. Tester à l'aide d'un système en temps réel

L'étape suivante de la conception par modélisation consiste à tester le modèle de niveau système sur un système en temps réel. Dans

cette étape, les ingénieurs convertissent automatiquement le modèle de niveau système en code C, HDL ou code PLC. Les ingénieurs peuvent générer du code pour les algorithmes de contrôle, le modèle de procédé ou les deux, en fonction de la façon dont ils choisissent de tester le système. Dans une conception par modélisation, la conversion automatique du modèle de niveau système élimine pour les ingénieurs système le besoin d'être experts dans l'écriture de code, empêche l'introduction d'erreurs et fait gagner du temps.

Le processus de génération automatique de code est analogue à la génération d'une trajectoire d'outil pour l'usinage d'une pièce à partir d'un dossier de CAO à trois dimensions. Si une erreur est découverte dans la pièce après son usinage, l'ingénieur vérifie et modifie le fichier de CAO et régénère le code pour la trajectoire de l'outil. Dans la conception par modélisation, les ingénieurs modifient le code par l'intermédiaire du modèle de niveau système, qui est un environnement naturel pour le dépannage du système. Ensuite, ils mettent le modèle à jour et le testent, puis régénèrent le code.

Les tests en temps réel se font sur des systèmes en temps réel réservés et se composent de deux types de tests : prototypage rapide (RP) et matériel incorporé (HIL). Pendant ces tests, les ingénieurs peuvent obtenir les données en temps réel et modifier les paramètres dans le code pendant l'exécution du test. Le tableau 1 montre certaines des options de tests en temps réel et illustre la flexibilité qui permet aux ingénieurs de détecter les erreurs critiques et exigeantes en termes de temps avant que le matériel réel soit disponible. Comme noté plus haut, il est beaucoup plus facile de remonter à la source des erreurs puisque le modèle de niveau système est la spécification, liée directement aux documents spécifiant les besoins.

Pendant le prototypage rapide, le système en temps réel est connecté au matériel réel. Puisque, dans la plupart des cas, le système de contrôle au sein du modèle contient toutes les E/S voulues, le modèle de niveau système crée automatiquement le code pour ces fonctions, éliminant pour les ingénieurs le besoin de coder celles-ci manuellement. Les tests HIL déploient le modèle de procédé de l'équipement sur un système en temps réel. Dans cette situation, les ingénieurs déploient les algorithmes de contrôle sur un système de test en temps réel ou sur le processeur cible voulu, et établissent la connexion au modèle de procédé, lequel fonctionne aussi en temps réel. Les tests HIL peuvent également être accomplis en utilisant le modèle de procédé simulé sur le bureau ou le poste de travail. <<