

Robotic machining

Development and validation of a numerical model of robotic milling in order to optimise the cutting parameters

Hoai Nam HUYNH

Abstract

Using industrial robots as machine tools is targeted by many industrials for their lower cost and larger workspace. Nevertheless, performance of industrial robots is limited due to their serial mechanical structure involving rotational joints with a lower stiffness. As a consequence, vibration instabilities, known as chatter, are more likely to appear in industrial robots than in conventional machine tools. Commonly, chatter is avoided by using stability lobe diagrams which determine the stable combinations of axial depth of cut and spindle speed. Although the computation of stability lobes in conventional machine tools is a well-studied subject, developing them in robotic milling is challenging because of the lack of accurate dynamic multibody models involving joint compliance to predict the posture-dependent dynamics of the robot.

In this work, the stability lobe diagrams of milling operations are computed in the time domain using a dynamic multibody model of the Stäubli TX200 robot, which is a six-axis serial robot. Since past studies revealed that the flexibility of industrial robots mainly originated from its joints, the multibody model of the Stäubli TX200 robot comprises joints with torsional and transversal compliances which represent the transmission and bearing flexibilities, respectively. Variants of the multibody model are developed in order to assess the influence of the link and controller flexibilities. A dynamic milling model is coupled to the simulated robot allowing the computation of the cutting forces and a representation of the virtual machined surface.

Once the inertia characteristics of the robot are identified, its elastic parameters are fitted to modal measurements obtained via experimental modal analysis. In particular, a straightforward identification method, relying on the curve fitting of the tool tip frequency response functions, is proposed to determine the elastic parameters of the multibody model. Parameters pertaining to the flexible links are determined by matching finite element models while the control parameters are settled based on the modal measurements. Cutting force coefficients are classically identified through milling experiments.

Using the robotic milling simulator validated in stable cutting conditions, stability lobe diagrams are simulated and experimentally validated. The influence of the feed direction and the aforementioned flexibilities is appraised on the system stability. The robotic milling simulator could reasonably capture the overall stability limits in all feed directions in aluminium and in steel. Appending the flexibility of the controller or the links did not lead to significant modification in the prediction of the stability charts. However, their consideration is important when dealing with static deflections. It was indeed shown that the consideration of flexible links induced 20 to 30 % of additional deflections while the ones introduced by the controller were almost negligible. Since robot structural modes depend on its posture, it appeared that stability limits were affected by the feed direction. It was also observed that in low-speed milling, mostly the low-frequency pose-dependent robot modes chatter while in high-speed milling robot wrist modes trigger the instability.

Usinage robotisé

Développement et validation d'un modèle numérique de fraisage robotisé pour optimiser les paramètres de coupe

Hoai Nam HUYNH

Résumé

L'utilisation de robots industriels comme machines-outils est visée par beaucoup d'industriels pour leur faible coût et leur large espace de travail. Néanmoins, les performances des robots industriels restent limitées à cause de leur structure mécanique série basée sur des articulations en rotation de raideur plus faible. Par conséquent, des instabilités vibratoires, appelées chatter, ont davantage tendance à apparaître avec des robots industriels qu'avec des machines-outils conventionnelles. Habituellement, le phénomène de chatter est évité en établissant des diagrammes de stabilité qui déterminent les combinaisons stables de profondeur de passe axiale et vitesse de rotation de broche. Bien que le calcul des lobes de stabilité soit un sujet bien étudié en machines-outils conventionnelles, les développer en usinage robotisé est difficile étant donné le manque de modèle multicorps précis incluant la flexibilité des articulations pour prédire la dynamique du robot dépendante de sa posture.

Dans ce travail, les diagrammes de stabilité d'opérations de fraisage sont calculés dans le domaine temporel grâce à un modèle multicorps dynamique du robot Stäubli TX200, qui est un robot six axes série. Étant donné que de précédentes études ont révélé que la flexibilité des robots industriels provenait essentiellement de ses articulations, le modèle multicorps du robot Stäubli TX200 comprend des articulations avec des souplesses en torsion et transversales qui représentent respectivement les flexibilités des transmissions et des paliers. Des variantes du modèle multicorps sont développées pour évaluer l'influence des flexibilités des membrures et du contrôleur. Un modèle de fraisage dynamique est couplé au robot simulé permettant le calcul des forces de coupe et une représentation de la surface virtuelle usinée.

Une fois les caractéristiques inertielles du robot identifiées, ses paramètres élastiques sont recalés aux paramètres modaux obtenus par analyse modale expérimentale. En particulier, une méthode d'identification directe, basée sur l'ajustement des courbes des fonctions de réponse en fréquence en bout d'outil, est proposée pour déterminer les paramètres élastiques du modèle multicorps. Les paramètres des membrures flexibles sont déterminés par correspondance avec des modèles éléments finis alors que les paramètres du contrôleur sont basés sur les mesures des paramètres modaux. Les coefficients de coupe sont classiquement identifiés par expérience de fraisage.

En utilisant le simulateur de fraisage robotisé validé pour des conditions de coupe stables, les diagrammes de stabilité sont simulés et validés expérimentalement. L'influence de la direction d'avance et des flexibilités susmentionnées est évaluée vis-à-vis de la stabilité du système. Il est ainsi montré que le simulateur de fraisage robotisé peut raisonnablement et globalement reproduire les limites de stabilité dans toutes les directions d'avance dans l'aluminium et dans l'acier. L'ajout des flexibilités des membrures ou du contrôleur n'a pas conduit à des modifications importantes dans la prédiction des diagrammes de stabilité. Cependant, leur considération est importante en termes de déviations statiques. Il a en effet été montré que la prise en compte des membrures flexibles induisait 20 à 30 % de déviations supplémentaires alors que celles introduites par le contrôleur étaient presque négligeables. Puisque les modes structurels du robot dépendent de sa posture, il est apparu que les limites de stabilité étaient affectées par la direction d'avance. Il a aussi observé qu'en fraisage basse vitesse, les modes de basses fréquences et dépendants de la posture sont principalement responsables du phénomène de chatter alors qu'en fraisage haute vitesse, les modes de poignet du robot déclenchent l'instabilité.