

# Robotic Machining :

## Tool trajectories adaptation to correct the dynamic and static inaccuracies

### Abstract

In today's industrial landscape, robots play a vital role across a spectrum of tasks. However, as manufacturing continues to evolve, emphasising more complex part geometries and materials, the demand for flexible production has driven interest in robotic machining. This technology offers notable benefits, including adaptability and portability. Yet, robotic machining encounters accuracy challenges due to inherent robot flexibility, causing deviations and vibrations. Consequently, extensive research has emerged, focusing on stability determination and trajectory compensation, both intrinsically linked by the necessity for accurate modelling of robot behaviour and machining operations. This research tackles these challenges through compensation methods within a robotic cell featuring a Stäubli TX200 robot and its digital twin. The positioning error in robotic machining typically comprises steady-state and transient components. The study aims to reduce both through trajectory corrections, based on the results from a virtual machining simulator encompassing the robot dynamic model.

A virtual machining simulator has been created, merging the multibody model of the robot with a 3D cutting simulator. The latter has been developed to estimate the cutting forces and the machined surface based on the tri-dexel method and has been validated experimentally. The tool trajectories are then transformed from CAM software (g-code) to a representation more suited to modifications with optimally placed Hermite splines.

The compensation method, driven by dynamic simulations of operations, is based on three core segments: gravity-induced correction of structural deflections, rectifying deviations arising from cutting forces, and adapting feed rates in regions with persistent errors. The compensation method achieved to strongly reduce the steady-state errors by 90 to 95%, pushing them below the  $60\mu\text{m}$  threshold. Transient errors also witness substantial reduction, resulting in cord error reduction by over 60%.

The efficiency of the compensation method is demonstrated through both simulation and experimental cases involving Aluminium 6082. In experimental scenarios, the error reduction aligns convincingly with simulation results, within the robot repeatability tolerance. These contributions open exciting directions for further investigations.

# Usinage Robotisé :

## Adaptation des trajectoires d'outil en vue de corriger les imprécisions dynamiques et statiques

### Résumé

Dans le paysage industriel actuel, les robots sont devenus essentiels pour de nombreuses tâches. Toutefois, à mesure que les méthodes de fabrication continuent d'évoluer, mettant l'accent sur des géométries de pièces plus complexes et des matériaux diversifiés, la demande de production flexible a suscité un intérêt croissant pour l'usinage robotisé. Cette technologie présente des avantages notables, tels que l'adaptabilité et la portabilité. Néanmoins, l'usinage robotisé est confronté à des défis de précision en raison de la flexibilité intrinsèque des robots, entraînant des écarts et des vibrations. Cette recherche aborde ces défis grâce à des méthodes de compensation au sein d'une cellule robotique avec un robot Stäubli TX200 et son jumeau numérique. L'étude vise à atténuer l'erreur de positionnement avec des corrections de trajectoire, en exploitant les résultats d'un simulateur d'usinage virtuel.

Ce simulateur a donc été créé, fusionnant le modèle multicorps du robot avec un simulateur de découpe 3D. Ce dernier ayant été développé pour estimer les efforts de coupes et la surface usinée en utilisant la méthode tri-dexel et a été validé expérimentalement. Les trajectoires d'outil sont ensuite produites en partant de logiciels CAM (g-code) vers une représentation plus adaptée aux modifications avec des splines d'Hermite placés de manière optimale.

La méthode de compensation est développée en se basant sur des simulations dynamiques des opérations. Le processus de compensation est divisé en trois parties principales : la correction des déformations dues à la gravité, la correction des écarts dus aux forces de coupe et la modification des vitesses d'avances dans les zones présentant une erreur persistante. Cette méthode de compensation permet de réduire les erreurs en régime permanent, les ramenant de 90 à 95% en dessous du seuil de  $60\mu\text{m}$ . Les erreurs transitoires sont également réduites, aboutissant à une réduction de plus de 60% de l'erreur.

L'efficacité de la méthode de compensation est confirmée par des simulations et des cas expérimentaux sur de l'aluminium 6082. Ces résultats concordent avec les simulations, se situant dans la tolérance de répétabilité du robot. Cette contribution ouvre la voie à de futures investigations prometteuses.