



AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

Le Doyen de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz –Fès – annonce que

Mr **EL YUBI EL IDRISI Mohamed Achraf**

Soutiendra : le Samedi 20/04/2024 à 10H00

Lieu : **FSDM – Centre Visioconférence**

Une thèse intitulée :

Elaboration d'une approche basée sur le deep learning pour la modélisation et l'optimisation des couts de la consommation d'énergie et du temps d'impression 3D FDM

En vue d'obtenir le **Doctorat**

FD : **Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication**

Spécialité : **Informatique**

Devant le jury composé comme suit :

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
Pr BENJELLOUN Nadia	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Présidente
Pr AGHOUTANE Badraddine	Faculté des Sciences, Meknès	PH	Rapporteur & Examineur
Pr OUANAN Mohammed	Faculté des Sciences, Meknès	PES	Rapporteur & Examineur
Pr RIFFI Jamal	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PH	Rapporteur & Examineur
Pr TAIRI Hamid	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Examineur
Pr YAHYAOUY Ali	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Examineur
Pr LAAOUINA Loubna	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Fès	PH	Examinatrice
Pr JEGHAL Adil	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Fès	PH	Co-directeur de thèse
Pr ZAKI Moncef	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse



Résumé :

Compte tenu de l'importance des systèmes d'impression par fabrication additive (FA) et de leurs apports avantageux par rapport aux systèmes basés sur la fabrication conventionnelle qu'elles soient formatrices ou soustractives, la technologie de la FA est de plus en plus adoptée en impression 3D, avec des taux d'utilisation en forte hausse. Cette remarquable croissance a eu un impact significatif et direct non seulement sur la consommation d'énergie mais aussi sur le temps de la fabrication, engendrant ainsi des coûts supplémentaires et importants en production.

Par conséquent, ce problème a attiré l'attention des acteurs de l'industrie et de la communauté des chercheurs, dont plusieurs études se sont concentrées sur l'évaluation, la prédiction et l'optimisation de la consommation d'énergie et du temps d'impression 3D, devenant ainsi l'un des principaux objectifs de la recherche actuelle dans le domaine de la fabrication additive, et en particulier, pour une impression de modélisation par dépôt en fusion (Fused Deposition Modeling (FDM)), vu son utilisation fréquente en impression 3D et de la popularité reconnue de ce procédé en industrie manufacturière.

Cependant, jusqu'à présent, il n'existe toujours pas un modèle efficace pour prédire et optimiser les coûts associés à la consommation d'énergie et au temps d'impression 3D FDM en tenant compte de l'orientation correcte de la pièce, de tel modèle devrait minimiser ces deux coûts lors d'une impression 3D FDM. Pour résoudre cette problématique, nous nous sommes basés sur les techniques de l'intelligence artificielle, et tout particulièrement sur les algorithmes de d'apprentissage profond, vu leur performance approuvée en la matière.

Dans un premier temps, douze algorithmes d'apprentissage automatique optimisés ont été utilisés pour modéliser et prédire la consommation d'énergie dans le processus d'impression FDM, à l'aide d'une base de données 3D FDM de composants mécaniques isovolumétriques (benchmark r3DIM). Le modèle le plus efficace a été choisi sur la base de quatre critères de performance qui sont: l'Erreur Absolue Moyenne (MAE), l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE), le R au carré (R²) et le Score de la Variance Expliquée (EVS). D'après les résultats de notre étude, le modèle GPR (Gaussian Process Regression) surpasse les autres modèles en termes de performance et avec une grande précision, tout en ayant les mesures statistiques suivantes: 99,16 % pour la valeur de la Variance Expliquée, 99,14 % pour le R-carré et des valeurs du MAE et du RMSE qui sont respectivement 3,88 et 5,79. Ainsi, avec le modèle adopté dans cette étude et avant chaque impression, nous pourrions prédire l'énergie nécessaire à l'impression en fonction des différentes orientations de la pièce. En outre, ce modèle offre la possibilité à l'utilisateur de comparer entre les valeurs de l'énergie existantes et éditées, ces valeurs sont données selon diverses orientations de la pièce, chose qui permettra une prise de décision sur la meilleure orientation à utiliser afin de minimiser la consommation d'énergie dans la phase de préimpression.

Dans un second lieu, nous avons proposé un modèle de prédiction simultanée, relatif à la consommation d'énergie et du temps de l'impression FDM, tout en tenant compte de l'orientation correcte de la pièce à imprimer et avec laquelle ces deux coûts sont optimisés. Dans ce sens, une base de données des composants mécaniques isovolumétriques a été utilisée pour la création des modèles appropriés, qui sont basés sur quatre algorithmes d'apprentissage automatique (MLP, XGBoost, RF et SVM), ces algorithmes ont été utilisés, compte tenu de leur performance en matière de prédiction et de leur capacité en apprentissage des données. Par conséquent et selon les résultats de l'étude comparative, le modèle du réseau neuronal proposé (dont l'architecture adoptée a été choisie parmi les 156 architectures testées) est nettement meilleur en précision par rapport aux autres modèles. Ainsi, la performance globale de ce modèle nous a donné les valeurs statistiques suivantes: 0,018 % pour la MSE, 0,989 % pour la valeur du MAE, 1,355 % pour la valeur de la RMSE, 99,60 % pour la valeur de la Variance Expliquée et 99,59 % pour la valeur du R-carré. Comme résultat, et en prenant quelques échantillons au hasard des pièces imprimées en 3D FDM, et en appliquant le modèle MLP adopté sur quelques pièces d'échantillon, nous pouvons économiser selon l'orientation correcte, plus de 23 watt en consommation d'énergie et plus de 15 minutes en temps d'impression, ce qui reste un acquis très important surtout pour les fabrications sérielles.

Cette étude reste utile pour comprendre les besoins en consommation d'énergie et du temps de la fabrication 3D FDM, ce qui pourrait fournir aux praticiens un outil d'aide à la décision afin d'améliorer les facteurs d'inefficacité en matière d'énergie et de temps d'impression. En outre, ce travail peut être étendu à d'autres procédés de la fabrication assistée par ordinateur, tout en bénéficiant de l'applicabilité des résultats de la recherche actuelle et en étudiant aussi l'effet d'autres paramètres qui peuvent influencer l'impression 3D, y compris l'aspect environnemental, d'où l'appel aux pratiques d'écologie industrielle.

Mots clés: Fabrication Additive, Impression 3D, Modélisation par Dépôt en Fusion, Apprentissage Automatique, Apprentissage Profond, Réseau Perceptron Multicouche, Régression par Processus Gaussien, Consommation d'énergie, Temps d'impression.



ELABORATION OF AN APPROACH BASED ON DEEP LEARNING FOR MODELLING AND OPTIMISING THE COSTS OF ENERGY CONSUMPTION AND FDM 3D PRINTING TIME

Abstract:

Given the importance of additive manufacturing (AM) printing systems and their advantages over systems based on conventional manufacturing, whether formative or subtractive, AM technology is being increasingly adopted in 3D printing, with usage rates rising sharply. This remarkable growth has had a significant and direct impact not only on energy consumption but also on manufacturing time, resulting in significant additional production costs.

As a result, this problem has attracted the attention of industry and the research community, with several studies focusing on the evaluation, prediction and optimisation of energy consumption and 3D printing time, thus becoming one of the main objectives of current research in the field of additive manufacturing, and in particular, for fused deposition modelling (FDM) printing, given its frequent use in 3D printing and the popularity of this process in the manufacturing industry.

However, to date, there is still no effective model for predicting and optimising the costs associated with energy consumption and FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing time, taking into account the correct orientation of the part. Such a model should minimise these two costs when FDM 3D printing. To solve this problem, we relied on artificial intelligence techniques, particularly deep learning algorithms, given their proven performance in this area.

Firstly, twelve optimised machine learning algorithms were used to model and predict energy consumption in the FDM process using a 3D FDM database of isovolumetric mechanical components (r3DIM benchmark). The most efficient model was selected on the basis of four performance criteria: Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), R-squared (R²) and Explained Variance Score (EVS). According to the results of our study, the GPR (Gaussian Process Regression) model outperforms the other models in terms of performance and with high accuracy, while having the following statistical measures: 99.16% for the Explained Variance value and 99.14% for the R-squared with MAE and RMSE values that are 3.88 and 5.79 respectively. Thus, with the model adopted in this study and before each print, we will be able to predict the energy required for printing according to the different orientations of the part. In addition, this model offers the user the possibility of comparing existing and predicted energy values, which are given for different part orientations, allowing a decision to be made on the best orientation to use in order to minimise energy consumption in the pre-printing phase.

Secondly, we proposed a simultaneous prediction model for the energy consumption and time required for FDM printing, taking into account the correct orientation of the part to be printed, with which these two costs are optimised. To this end, a database of isovolumetric mechanical components was used to create the appropriate models, which are based on four machine learning algorithms (MLP, XGBoost, RF and SVM). These algorithms were used in view of their predictive performance and their ability to learn from the data. As a result, and according to the results of the comparative study, the proposed neural network model (whose adopted architecture was chosen from the 156 architectures tested) is significantly more accurate than the other models. The overall performance of this model gave us the following statistical values: 0.018% for the MSE, 0.989% for the MAE, 1.355% for the RMSE, 99.60% for the Explained Variance and 99.59% for the R-squared. Therefore, and taking a few random samples of the parts printed in 3D FDM, and based on the MLP model adopted and applying it to a few sample parts, depending on the correct orientation, we can save more than 23 watts in energy consumption and more than 15 minutes in printing time, which is a very important achievement especially for serial production.

This study remains useful for understanding the energy and time consumption requirements of 3D FDM manufacturing, which could provide practitioners with a decision support tool to improve energy and printing time inefficiencies. In addition, this work can be extended to other computer-aided manufacturing processes, while benefiting from the applicability of current research results and also studying the effect of other parameters that can influence 3D printing, including the environmental aspect, hence the appeal to industrial ecology practices.

Key Words:

Additive Manufacturing, 3D Printing, Fused Deposition Modeling, Machine Learning, Deep Learning, Multilayer Perceptron Network, Gaussian Process Regression, Energy Use, Print Time.