



HAL
open science

Génération automatique de systèmes horlogers anciens

Vincent Commin, Sébastien Horna, Konstantin Protasov, Samuel Peltier, Arthur Cavalier

► To cite this version:

Vincent Commin, Sébastien Horna, Konstantin Protasov, Samuel Peltier, Arthur Cavalier. Génération automatique de systèmes horlogers anciens. Journées du Consortium 3D pour les Humanités Numériques (Huma-Num), S. Rassat; M. Chayani; L. Voison; A. Zasadzinski; E. Interdonato; C. Delevoie; F. Laroche; X. Granier, Nov 2024, Nancy, France. pp.19-21. <hal-05044522v2>

HAL Id: hal-05044522

<https://hal.science/hal-05044522v2>

Submitted on 6 May 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

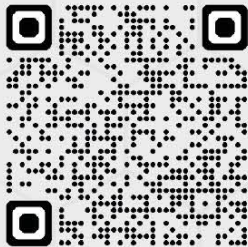


Journées du Consortium 3D pour les Humanités Numériques



26-28 nov. 2024

Nancy



GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DE SYSTÈMES HORLOGERS ANCIENS

V. Commin¹, S. Horna¹, K. Protassov², S. Peltier¹, A. Cavalier¹

au nom de collaboration CHRONOSPEDIA

¹Université de Poitiers, CNRS, XLIM, Poitiers, France

²LPSC, Université Grenoble-Alpes, CNRS/IN2P3, Grenoble, France

vincent.commin@univ-poitiers.fr
konstantin.protassov@univ-grenoble-alpes.fr

RÉSUMÉ

La modélisation 3D est devenue un outil essentiel pour l'étude et la médiation du patrimoine culturel. En horlogerie, elle permet non seulement la visualisation, mais aussi la simulation de mouvements complexes. Elle permet en particulier de représenter des mécanismes et d'analyser leur fonctionnement à des fins scientifiques et pédagogiques. Cependant, créer des modèles 3D fonctionnels d'horloges exige du temps et une double expertise : horlogère et mécanique. Nous proposons une méthode de génération automatique d'horloges mécaniques via un graphe d'interaction formalisé. Ce graphe décrit les pièces et les sous-assemblages de pièces, en respectant des contraintes définies avec des experts. Il sert de base à un algorithme de propagation des paramètres pour produire différents modèles 3D d'horloges valides nécessitant peu de données initiales.

MOTS-CLÉS: Modélisation géométrique, Modélisation procédurale, Assemblages mécaniques, Mécanismes d'horlogerie.

CAPTATION VIDÉO DE LA CONFÉRENCE

<https://www.canal-u.tv/chaines/c3dhn/reconstruction-automatique-de-systemes-horlogers-anciens-intervention-v-commin-xlim>

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

L'évolution de l'horlogerie mécanique, s'étant quasi exclusivement orientée vers la production de montres (i.e. l'horlogerie du petit volume), a progressivement supplanté l'étude et l'apprentissage de l'horlogerie de grande et de moyen volume. Ce faisant, le savoir et le savoir-faire liés aux mécanismes et aux méthodes de construction se perdent. Il est donc crucial de mettre en place des solutions pour préserver ce patrimoine. Dans cette optique, le consortium CHRONOSPEDIA¹, fondé par François Simon-Fustier, maître d'art en horlogerie, et Konstantin Protassov, professeur à l'Université Grenoble Alpes, vise à créer une encyclopédie numérique dédiée aux grandes et moyennes horloges, couvrant la période du XIV^e au XIX^e siècle. Les modèles 3D des différents mécanismes, ainsi que les documents associés, sont mis à disposition du grand public sur le site du consortium. Aujourd'hui, le projet passe de la phase de sa conception (structuration générale, choix des formats de fichier, définition des métadonnées, ...) à l'étape de production massive du contenu. Un des défis majeurs dans cette phase est l'accélération significative du processus de production des modèles 3D et la réduction notable du coût de leur réalisation.

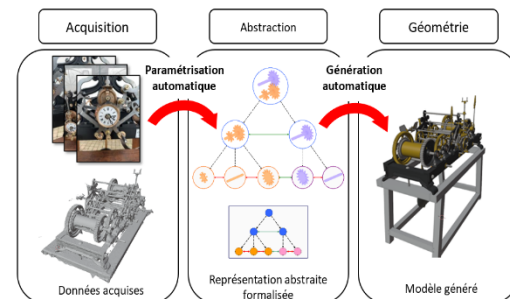


Figure 1 - Processus de numérisation d'un mécanisme horloger proposé. Une phase d'analyse des données acquises paramétrise un graphe d'interactions modélisant de manière abstraite le mécanisme horloger. Les paramètres manquants des pièces du mécanisme sont alors calculés à l'aide d'un algorithme de propagation des données. Le modèle 3D est alors généré à partir des informations du graphe.

Actuellement, le processus de numérisation nécessite le démontage de l'horloge afin de relever les cotes des pièces du mécanisme. Chaque pièce, ainsi que l'ensemble de l'assemblage, est ensuite modélisée à l'aide du logiciel SolidWorks. Cette chaîne de numérisation représente en moyenne 60 à 80 heures de travail pour une horloge de taille moyenne et peut s'étendre sur plusieurs mois dans le cas d'horloges monumentales, comme celle du palais national de Mafra, au Portugal.

Dans l'optique d'accélérer cette étape, la thèse issue de la collaboration entre l'Institut multidisciplinaire de l'Intelligence Artificielle (MIAI@Grenoble Alpes) et l'institut XLIM a pour objectif d'automatiser l'ensemble du processus de numérisation des mécanismes horlogers. La conversion de données acquises directement en modèle 3D CAO étant limitée par des problèmes d'occultations fréquents. Pour éviter ces

¹ <https://chronospedia.com/s/chronospedia/page/home>

problèmes, nous proposons, une structure de données représentant le mécanisme de manière abstraite appelée graphe d'interactions, qui permet une paramétrisation de toutes les pièces du mécanisme (Figure 1, au centre). Comme les informations nécessaires à cette structure de données doivent être extraites des acquisitions, les problèmes liés, entre autre, à l'occultation des pièces peuvent rendre les données incomplètes. Afin de répondre à ce problème, nous présentons un algorithme de propagation des paramètres pour déduire les potentielles informations manquantes. Le modèle 3D du mécanisme paramétré par le graphe d'interactions est ensuite affiché dans un logiciel de visualisation (Figure 1, à droite).

2. GRAPHE D'INTERACTIONS

L'objectif de ce graphe est de fournir une structure de données simple à manipuler tout en gardant l'information des interactions. Chronospedia se limitant aux horloges grandes et moyennes du XIV^e au XIX^e, permet une énumération finie des différents mécanismes utilisés durant cette période. Par conséquent, la structure du graphe, c'est-à-dire les types de pièces et liaisons, sont connues à l'avance.

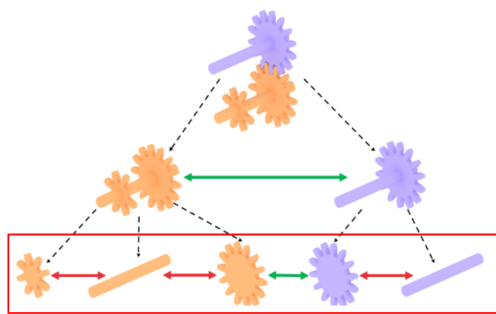


Figure 2 - Graphe d'interactions représentant les interactions physiques (arêtes pleines) et les interactions sémantiques définissant la hiérarchie des sous-assemblages (arêtes pointillées). Les pièces encadrées correspondent aux composants de base du mécanisme.

Dans la littérature, les mécanismes sont souvent représentés par des graphes ayant une structure similaire : un nœud représente une pièce ou un groupe de pièces, tandis qu'une arête décrit la relation entre deux pièces. La différence entre ces structures de données réside dans les caractéristiques attribuées aux nœuds et aux arêtes. En mécanique, le graphe cinématique va principalement décrire les liaisons par leurs degrés de liberté réduisant les pièces à des classes d'équivalences là où le travail de Lin et al [2] ne considère que 3 types de liaisons mais fait bien la distinction entre les différentes pièces du mécanisme. D'autres représentations préfèrent l'utilisation de formalismes préexistant comme des diagrammes de classe UML pour décrire des pièces par leurs caractéristiques et fonctions [3] et vont permettre d'ajouter des liaisons hiérarchiques entre les différentes pièces.

Notre structure, appelée graphe d'interactions, combine plusieurs de ces approches. Elle intègre une représentation des liaisons mécaniques (par exemple : encastrement, pivot, etc.) ainsi qu'une hiérarchie inspirée des travaux de Katia Lupinetti [4], qui permet de travailler sur différents niveaux de sous-mécanismes. Dans ce

graphe, chaque nœud représente une pièce ou un sous-mécanisme de l'assemblage, et stocke ses paramètres (par exemple : pour une roue dentée, le nombre de dents, le diamètre, la vitesse de rotation, etc.). Chaque arête décrit une interaction entre deux pièces, qui peut être soit mécanique (par exemple, une jointure entre deux pièces ou sous-mécanismes), soit sémantique (par exemple, une pièce appartenant à un sous-assemblage).

La hiérarchie entre les pièces et les sous-assemblages (Figure 2, arêtes pointillées) est calculée automatiquement à partir des liaisons physiques des pièces du mécanisme. Cette hiérarchie correspond alors à un découpage en classe d'équivalence.

3. PROPAGATION DES PARAMÈTRES

Dans notre cas de figure, l'objectif final étant de reconstruire un mécanisme horloger existant, il est nécessaire de calculer, entre autres des paramètres essentiels pour la géométrie tels que la position et l'orientation des différentes pièces. Le graphe doit être déduit à partir d'acquisition mais celles-ci peuvent parfois être incomplètes. Pour répondre à ce problème, nous pouvons déterminer les caractéristiques manquantes en fonction du voisinage des pièces (déterminé par les liaisons du graphe). Ce travail se base sur les méthodes de satisfaction de contraintes [5] (Constraints-Satisfaction Problems) habituellement représentées sous la forme de graphe. Des méthodes similaires permettent de générer des modèles 3D à partir de contraintes, notamment dans le domaine de la génération procédurale, mais elles se concentrent principalement sur la détermination du type de pièce à placer [6], [7], [8]. Dans notre cas, les pièces sont déjà identifiées, et nous cherchons à calculer leurs paramètres afin de reconstruire l'assemblage.

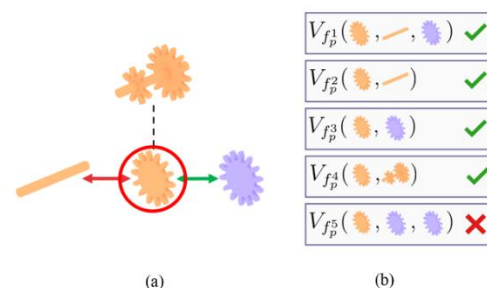


Figure 3 - Calcul des paramètres de la roue orange en fonction de son voisinage (a) déduit par l'ensemble de fonction définie par l'horlogerie (b). Le choix de la fonction est effectué parmi l'un des calculs valides.

La plupart des caractéristiques des pièces peuvent être déduites en fonction de leur voisinage grâce au modèle métier de l'horlogerie². Par exemple, le nombre de dents d'une roue peut être déterminé à partir d'une vitesse de rotation et du ratio de l'engrenage. Notre algorithme identifie la meilleure fonction à utiliser parmi un ensemble de fonctions disponibles pour déterminer les paramètres d'une pièce. Le choix de la fonction à utiliser s'appuie sur le type et les paramètres des pièces voisines récupérées via le graphe d'interactions (Figure 3). Ce processus est ensuite répété pour la pièce suivante la plus

² <https://watchprint.com/fr/techniques-horlogeres/75-theorie-d-horlogerie.html>

contrainte, c'est-à-dire celle qui offre le plus d'options pour calculer ses caractéristiques. L'algorithme continue ensuite jusqu'à ce que toutes les pièces soient calculées ou qu'il n'y ait plus assez d'informations pour déterminer un nouveau calcul.

Dans certains cas, il peut ne plus y avoir de solution pour calculer les paramètres d'une pièce il est nécessaire de faire un choix arbitraire sur un paramètre d'une pièce (par exemple : la position d'une roue sur un axe). Ce choix implique que plusieurs versions du mécanisme peuvent être déduites d'un même ensemble de données initiales (Figure 4).

En résumé, l'algorithme de propagation calcule les données manquantes d'un graphe d'interactions représentant un mécanisme horloger dans le but de pouvoir afficher le modèle 3D correctement. Les choix parmi plusieurs solutions lors de cette phase impliquent différentes versions de mécanismes cohérent pour un même graphe.

4. CONCLUSION

Nous avons présenté le graphe d'interactions, une structure de données permettant la représentation abstraite de mécanismes horloger ainsi qu'un algorithme pour y propager les paramètres. Notre méthode permet, à partir de la définition des liaisons du mécanisme (le graphe d'interactions), de générer plusieurs versions d'une même horloge (Figure 4). Cependant, automatiser la modélisation de mécanismes horloger reste une tâche complexe et nécessitant définition précise des contraintes ainsi que des caractéristiques de chaque pièce. À court terme, l'objectif est de rendre la définition de ces éléments accessible à des utilisateurs non experts. À plus long terme, nous prévoyons d'automatiser entièrement l'extraction automatique d'un maximum de caractéristiques pour chaque pièce.

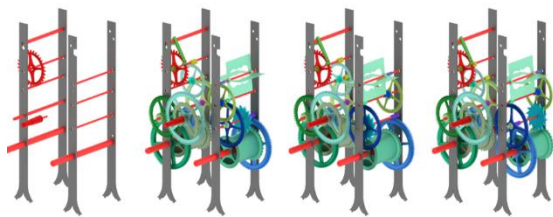


Figure 4 - Différentes générations d'une partie de mécanisme d'une horloge comtoise à partir d'un jeu en entrée parcellaires (pièces rouges)

5. RÉFÉRENCES

[1] **T. Boudart et K. Protassov**, « La 3D au secours du patrimoine horloger. CHRONOSPEDIA : Encyclopédie virtuelle du savoir horloger », présenté à Les journées du Consortium 3D pour les SHS 2023 : 10 ans d'expérience , 10 ans à venir ? (jc3dshs2023), nov. 2023, p. 77. Consulté le: 7 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04484358>

[2] **M. Lin, T. Shao, Y. Zheng, N. J. Mitra, et K. Zhou**, « Recovering Functional Mechanical Assemblies from Raw Scans », IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., vol. 24, no 3, p. 1354-1367, mars 2018, doi: 10.1109/TVCG.2017.2662238.

[3] **S. Vogel et P. Arnold**, « Towards a more complete object-orientation in graph-based design languages », SN Appl. Sci., vol. 2, no 7, p. 1235, juill. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2959-x.

[4] **K. Lupinetti**, « Identification de caractéristiques de forme et de structure d'assemblages de pièces CAO pour la recherche dans des bases de données », 2018.

[5] **V. Kumar**, « Algorithms for Constraint-Satisfaction Problems: A Survey », AI Mag., vol. 13, no 1, Art. no 1, mars 1992, doi: 10.1609/aimag.v13i1.976.

[6] **P. Merrell**, « Example-based model synthesis », in Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games, Seattle Washington: ACM, avr. 2007, p. 105-112. doi: 10.1145/1230100.1230119.

[7] **M. Gumin**, Wave Function Collapse Algorithm. (septembre 2016). C#. Consulté le: 20 septembre 2024. [En ligne]. Disponible, sur: <https://github.com/mxgmn/WaveFunctionCollapse>

[8] **H. Kim, T. Hahn, S. Kim, et S. Kang**, « Graph Based Wave Function Collapse Algorithm for Procedural Content Generation in Games », IEICE Trans. Inf. Syst., vol. E103.D, mai 2020, doi: 10.1587/transinf.2019EDP7295.