

Robotic Assembly of Integrally-Attached Timber Plate Structures

From Computational Design to Automated Construction

Abstract:

The digitization of timber construction, the emergence of engineered wood products, and the urgent need to drastically reduce buildings' environmental impact have given a rebirth to wood as a construction material. On the one hand, increasing the use of timber in building technology has the potential to transform cities into carbon sinks. On the other hand, the growing availability of Computer Numerical Control (CNC) machines and industrial robotic arms makes woodworking less labor-intensive, less time-consuming, and thus more cost-effective. Besides, recent advances in Computer-Aided Design and Manufacturing (CAD/CAM) have paved the way for a wide range of architectural and structural design possibilities by overcoming this organic material's inherent limitations.

It is within this context that a significant focus has been put on Integrally-Attached Timber Plate Structures (IATPS) at the Laboratory for Timber Constructions (IBOIS, EPFL) since the last decade. This innovative yet sustainable construction system combines traditional craft with state-of-the-art technology. Timber panels are cut with a CNC and connected with timber joints inspired by ancient woodworking techniques to create spatial structures that can reach up to 50 m without glue or screws. A significant asset lies in the possibility of building both standard and bespoke buildings from simple flat-packed panels whose pre-cut shape informs the assembly. While previous research has focused on the computational design and digital fabrication of IATPS, this thesis has, for the first time, investigated the automation of the assembly process. The objective was to determine the feasibility of assembling these structures with a robotic arm and to identify the influence of assembly constraints on the design.

The methodology adopted a multidisciplinary approach integrating architectural, civil engineering, robotics, and computer science considerations. First, a computational framework was developed to enable a streamlined workflow from architectural design to robotic construction. This included the parametrization of timber joints, the implementation of algorithms to address modular assembly sequences, and a collaboration with an industrial partner to simulate robot trajectories within the design interface. Second, full-scale experiments were carried out with a 6-axis industrial robotic arm to assess and tackle the challenges associated with the robotic insertion of timber panels. A feedback loop relying on computer vision was developed to improve the robot's accuracy. In addition, design guidelines were established to determine an optimal shape for timber joints to reduce friction forces during insertion.

A key achievement of the thesis is to have made IATPS more accessible to the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) community through the release of Manis, an open-source Grasshopper plugin. This integrated design tool automates the 3D modeling of timber joints, the generation of CNC cutting files and robot instructions, as well as the creation of Finite Element meshes for subsequent structural analysis. Furthermore, the thesis gives new perspectives on mass timber construction by providing a framework for the industrial implementation of wood-wood connections in automated prefabrication lines. It proposes an innovative assembly process that requires no mechanical fasteners or chemical bonding and is fully automated from design to construction.

Keywords: timber plates; timber panels; timber joints; IATPS; robotic assembly; robotic insertion; insertion vector; construction automation; prefabrication; design for manufacture and assembly (DFMA).

Robotic Assembly of Integrally-Attached Timber Plate Structures *From Computational Design to Automated Construction*

Résumé :

La digitalisation du secteur de la construction en bois, l'émergence du bois d'ingénierie ainsi que la nécessité de réduire drastiquement l'impact environnemental des bâtiments ont suscité un regain d'intérêt pour le bois en tant que matériau de construction. D'une part, l'augmentation de l'utilisation du bois dans la construction a le potentiel de transformer les villes en puits de carbone. D'autre part, l'accessibilité croissante des machines-outils à commande numérique (CNC) et des bras robotisés rend le travail du bois moins difficile, moins long et moins coûteux. En outre, les récentes avancées dans le domaine de la conception et de la fabrication assistées par ordinateur (CAO/FAO) ouvrent de nouvelles possibilités conceptuelles en permettant de surmonter les limites inhérentes à ce matériau organique.

Dans ce contexte, les Integrally-Attached Timber Plate Structures (IATPS) ont été développées au cours de la dernière décennie au Laboratoire de Construction en Bois (IBOIS, EPFL). Ce système de construction innovant et durable associe artisanat traditionnel et technologie de pointe. Des panneaux de bois connectés par des joints s'inspirant des anciennes techniques de menuiserie, sont découpés à l'aide d'une CNC et assemblés en structures spatiales pouvant atteindre des portées de 50 m sans colle ni vis. Un atout majeur réside dans la possibilité de créer des structures tant conventionnelles que complexes à partir de simples panneaux pouvant être transportés à plat et dont la forme prédécoupée informe l'assemblage. Alors que les recherches antérieures se sont concentrées sur l'automatisation du processus de conception et de fabrication des IATPS, cette thèse investit pour la première fois l'automatisation de leur assemblage. L'objectif principal était de déterminer la faisabilité d'assembler ces structures avec un bras robotisé et d'identifier l'influence des contraintes de l'assemblage robotisé sur la géométrie des connections.

Une approche multidisciplinaire intégrant des considérations liées à l'architecture, au génie civil, à la robotique, et à l'informatique a été adoptée. Premièrement, un environnement computationnel a été développé afin de rationaliser l'ensemble des étapes de production. Cela inclut la paramétrisation de joints en bois, l'implémentation d'un algorithme pour résoudre les séquences d'assemblage modulaire, et la simulation des trajectoires robotiques. Deuxièmement, des expériences d'insertion robotisée ont été menées. Une boucle de rétroaction reposant sur la vision par ordinateur a été développée pour améliorer la précision du robot. Par ailleurs, un guide de conception pour les joints a été établi afin de proposer une forme optimale réduisant la friction lors de l'insertion.

Cette thèse constitue une avancée majeure vers une plus large adoption des IATPS. L'une des réalisations est la publication de Manis, un plugin pour Grasshopper disponible en accès libre. Cet outil automatise la modélisation 3D des joints en bois, la génération des fichiers de découpe CNC et des instructions pour l'assemblage robotisé, ainsi que la création de maillages aux éléments finis pour l'analyse structurelle. En outre, ce travail ouvre de nouvelles perspectives pour les acteurs du secteur de la construction en bois concernant l'utilisation des connecteurs bois-bois sur les lignes de préfabrication. La thèse propose ainsi un processus d'assemblage innovant et entièrement automatisé de la conception jusqu'à la construction.

Mots-clés : plaques de bois; panneaux de bois; joints en bois; IATPS; assemblage robotisé; insertion robotisée; vecteur d'insertion; construction automatisée; préfabrication; conception pour la fabrication et l'assemblage.