

TSUGITE: インタラクティブな木ジョイントの設計・加工システム

Maria Larsson 吉田博則 梅谷信行 五十嵐健夫[†]

概要. 本研究では、フレーム構造用の木材ジョイントを設計・製作するためのインタラクティブなシステム「Tsugite」を提案する。フレーム構造用のジョイントの設計、手作業での製作は容易ではなく、時間を要す。本システムは、モデリング・インターフェースとコンピュータ数値制御（CNC）による加工を組み合わせることで、カスタムジョイントの作成を容易にする。設計空間には、効率的な幾何学的解析と組み合わせ検索を可能にするボクセルの 3D グリッドを採用している。ユーザーはリアルタイムのグラフィカルなフィードバックを受けながらジョイントを編集し、スライド方向、加工性、接合方向に対する耐久性などの性能指標に基づいた提案を受けることができる。接合部の設計が完了すると、3 軸の CNC フライス盤を用いて、コーナーの丸みをつけて接合性を確保する専用のパス設計アルゴリズムを用いて接合部を製造することができる。

1 はじめに

釘を使わない木材の接合方法は、伝統的な工芸技術である。建築や家具の製作に应用されており、見た目の美しさ、品質の高さ、組み立てやすさといった点で評価されている。伝統的な接合方法には、ほぞつぎ、相欠きつぎ、組みつぎなど様々な種類があり、これらの形状は、機能性と見た目の美しさを兼ね備える。このようなジョイントの設計と解析は、幾何学的な複雑さと同時に考慮しなければならない点が多くあり、容易ではない。さらに、手工具を用いた製作は、時間と労力を多く要する。そこで、本研究では、木工ジョイントを作成するためのインタラクティブなシステムを提案する。このシステムでは、実用的な多数の接合特性を解析し、CNC フライス加工によって接合部をデジタル処理する。システム名「Tsugite」は、日本語の「継手」に由来する。設計空間には、各ボクセルが一意的な木材に属する、規則的に配置された 3D グリッドを採用した。この設定は効率的な計算に適しており、リアルタイムのフィードバック、提案、組み合わせ検索を可能にしている。本稿は ACM UIST2020 で発表済みの論文をまとめたものである[23]。

2 関連研究

Yao らは、自由な形状の装飾ジョイントをデザインするためのツールを提案した[21]。このツールは、幾何学的自由度の高い装飾的なジョイントの設計をサポートする。しかし、このツールはリアルタイム

に提案やフィードバックを提供するものではない。

近年の複数の研究では、ジョイントや 3D パズルのトポロジカルな最適化を行い、さまざまな動作を実現している[2, 13, 14, 18]。これらでは、我々の研究と同様に、ボクセルの 3D グリッドのデザイン空間内にジョイントを作成する。しかし、ユーザーインターフェースがなく、CNC による加工性や木目の方向に対する耐久性などの実用的な制約が考慮されていない。

組立可能な構造物を設計・製作するための計算機システムを提案している研究は、木材から CNC マシンでジョイントを削り出すシステム[7, 15, 22]や、レーザーカッターや 3D プリンタでオーダーメイドのジョイントを作るシステム[1, 4, 6, 10]など、多数ある。さらに、標準的な木工工具や、標準的な工具とデジタルファブリケーションマシンを組み合わせることで実行できる製作プランを作成する方法を提案している研究も存在する[8, 19]。さらに別の研究では、家具の物理的な妥当性を分析し、モデリング中にユーザーに提案を提供している[16]。これらのシステムの対象は大局的な最適化であり、ジョイントそのものの自由度は高くなく、いくつかの標準ジョイントをパラメータで調整する程度となっている。本研究は、これらのシステムとは異なり、大局的な構造ではなく、ジョイントそのもののデザインに焦点を置いている。

CNC ファブリケーションに特化したジョイント形状に着目した研究も複数ある。Gros は、3 軸の CNC マシンに適したジョイント形状を設計し、「50 Digital Wood Joints」というオンラインライブラリをアップロードして自由に使えるようにした[3]。金崎と楊も同様に、日本の伝統的な形状のジョイント

Copyright is held by the author(s).

[†] 東京大学

をデジタルで加工可能な形状に変換することを目指している[5, 20]. しかし、彼らの成果は、直交する2本以下の材木の間の1つか2つのジョイント形状に限られている。

また、CNCフライスのツールパス設計は1970年代から研究されている。ツールパス最適化問題は、一般に、意図した形状に切り込まずに除去される材料の体積を最大化することとして定式化される[11]. 本システムの設定では、相手の木材とぴったり合うように鋭い外角を切り落とす等、意図した形状に切り込む必要がある。到達できない領域があるジョイントのパス設計の問題は、分かっている範囲ではこれまでに検討されていない。

異方性材料の対象物の向きを活用した例として、Li と Barbic [9]は、木材、植物、筋肉などの異方性材料の挙動をシミュレートするモデルを提案している。Umetani と Schmidt [17]は、フィラメントを用いた3Dプリントでは、xy面での連続した材料の結合よりもz方向での層間の材料の結合が弱いことを観察し、これを用いて物体の向きを適宜変更している。

3 ユーザインタフェース

本システムは、長方形の断面を持つ木材を接続するための単一の木材ジョイントを設計するツールとして実装されている。図1にその概要を示す。ユーザーは、スライド方向、交点の位置、材木の数などのジョイントタイプの変数を指定する(図1a)。これらの情報は、構造物や家具の全体的な設計から得られるものであり、その自動設定は本研究の範囲外である。マニュアル編集モードでは、グラフィカルなフィードバックや提案を受けながらジオメトリを操作する(図1b)。ギャラリーモードでは、ユーザーは有効なジオメトリを見て、その中から1つを選ぶことができる(図1c)。最後に、Tsugiteシステムは、フライスビットの半径を入力とし、ツールパスをCNCフライス盤にエクスポートする。

(図1d)

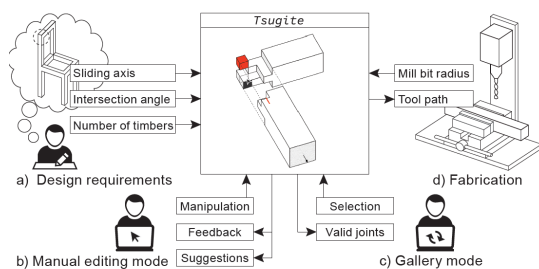


図1. 提案システムの概要.

3.1 基本的な操作

ユーザーは、スライド方向の面を押したり引いたりすることで、ジョイントを編集することができる(図2a)。さらに、材木の本体をクリックしてドラッグすることで、材木の位置や向きを変更することができる(図2b, 2c)。また、x, y, zキーを押すことで、直交するスライド軸を選択することができる(図2d)。スタックのように、すべての木材が1つのスライド軸に沿ってスライドするデザインにも対応している。交差する木材の数は、理論的には6本まで対応可能だが、実際の加工場面を考慮すると、4本以下の木材の接続に適している(図2e)。デフォルトのボクセル解像度(ジョイントの要素分割数)は、 $3 \times 3 \times 3$ であり、2~5の間で変更可能になっている(図2f)。また、ユーザーは、非直交の交差角度(図2g)、木材の断面の高さと幅(図2h)を設定することができる。

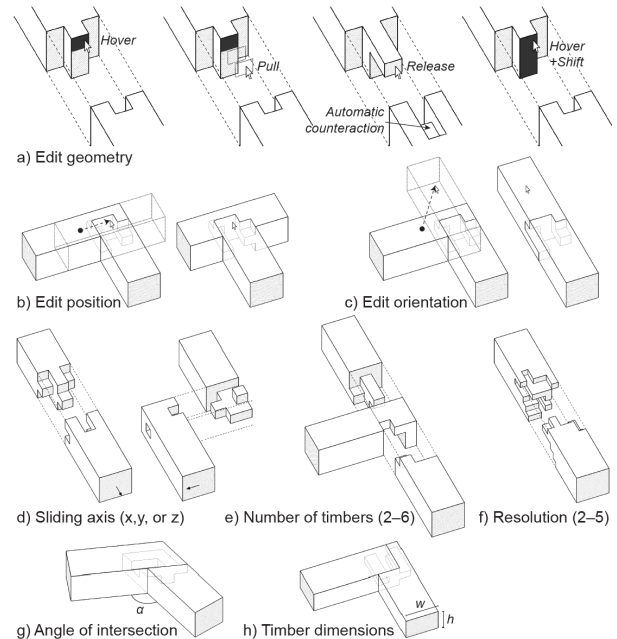


図2. 基本的な操作.

3.2 フィードバック

Tsugiteは、以下の8つの性能指標に基づいて、ユーザーに視覚的なフィードバックを提供する(図3)。

- Connectivity:** 木材の本体から切り離されたボクセルは赤で表示される
- Bridging:** 木材の中ほどにジョイントがある場合(Tジョイント)、その木材のジョイントの両端は接続(ブリッジ)されていなければならない。ブリッジされていない場合部分が二色で表示される。
- Milling direction:** 切削は一方からのみ行われるので、そのような条件で加工できない形状の場合

合は、木材の本体がオレンジ色で表示される。このような状況は、接合部に 3 本以上の木材がある時の、間に挟まれた木材にのみ発生する。

d) **Checkerboard**: 対角上に 2 種類の材木が存在しているパターンは禁止されており、中央に太い赤い縦線で示される。禁止されている理由の詳細については、実装の項を参照。

e) **Slidability**: ジョイントは一方方向からのみスライドできることが望ましい。現状のデザインでスライド可能な方向が、各木材の端にある矢印によって示される。複数のスライド方向がある場合は、その木材のアウトラインが赤く表示される。

f) **Durability**: 木目の方向に対して垂直に突き出ている部分は簡単に折れてしまう可能性がある。従来のジョイント形状でもこのようなパーツは避けられている。そのためそのようなボクセルは黄色で表示される。形状からの単純な判定であり物理的な負荷の計算を行っているわけではない。

g) **Contact area**: 接着を目的とした接合部では、異なる木材の素材同士が接触する接触面が大きいほど望ましい。接触面はテクスチャで表示される。

h) **Friction area**: 摩擦で固定することを目的とした接合部では、摩擦面積が大きい方が好ましい。摩擦面とは、接触面の中で面の法線がスライド方向と垂直なものである。摩擦面はテクスチャで表示される。形状からの単純な判定であり物理的な摩擦の力を計算しているわけではない。

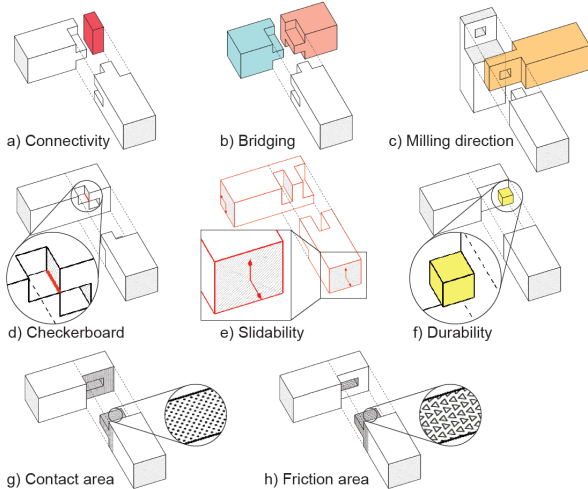


図 3. 視覚フィードバック。

3.3 加工

デザインを決定した後、ユーザーはミリングパスをプレビューし、それを CNC マシンにエクスポートすることができる。ジョイントを製作するには、CNC マシンのベッドに材料をセットし、マシンの起点を設定し、マシンを稼働させる。

4 実装

本システムは、3 軸の CNC マシンによって加工可能なジョイントの設計を支援する (4.1)。支援にあたっては、8 種類の性能指標の評価を行う (4.2)。設計が完了すると、ジョイントの組立性を確保するようにパス設計を行う (4.3)。このシステムは Python で実装され、OpenGL と GLFW が主な依存関係にある。

4.1 加工可能性

ジョイントの幾何学的基準は、製作方法によって異なる。本研究では、手頃な価格で普及している標準的なフライスビットを装備した 3 軸 CNC マシンを用いてジョイントを製作する。この機械のセットアップには、2 つの大きな制約がある。まず、内側からみて凹んだ角を円筒状のフライスビットで内側から削ることは不可能である (図 4a)。このような角は、フライスビットの半径で丸みを帯びていた形状となる。第二に、機械は材料の上からしかアプローチできない。つまり、上からのアクセスが妨げられているような形状を加工することはできない (図 4b)。

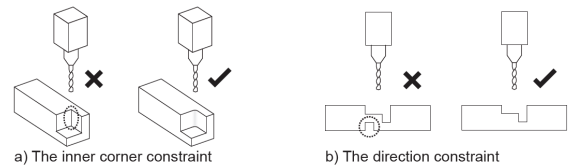


図 4. 3 軸 CNC を用いた際の加工の制約。

内側の角の制約(図 4a)は、システムにとって 2 つの意味を持つ。一つ目の問題は、ボクセル化された形状を、ジョイントの各木材を個別に考慮する従来のパスプランニングツールで加工しようとした場合、1 本の木材の内側の角の余剰材料が、他の木材の対応する鋭い外側の角と衝突するため、ピースを組み立てることが不可能となる (図 5a)。この問題に対する一般的な解決策は、内側の角からさらに材料を取り除く (図 5b) か、外側の角を丸くする (図 5c) かの二通りとなる。この 2 つの解決策は、既存のデジタルジョイントにも見られる。本研究では、エアポケットがない方が見た目が良く、摩擦面積と強度が増すため、後者の解決策 (外側の角を丸める) を採用した。角を丸めることを自動化することは、本研究の特殊なパスプランニングアルゴリズムの重要な機能である (詳細は「パス計算」の項を参照)

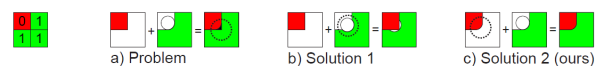


図 5. 通常のパス計画の問題.

二つ目の問題は、対角上に 2 種類の材木が存在する Checkerboard に関するものである (図 6). もし、追加のルールなしに Checkerboard を認めると、材木を組み立てることができなくなる (図 6a). 代替ルールとしては、1 本の材木の角を外側の角のように丸めることが考えられる (図 6b). しかし、2 本目の材木の 2 つの突出した部分の間の隙間 (d) は、フライスの直径よりも狭くなり、製作することができなくなる. 3 つ目の可能性は、この隙間をフライスビットが通過できるまで大きくすることである (図 6c). この場合は、形状を製作して組み立てることができるが、システムが複雑になるため、あまり良い解決策ではない (どの材木にどのルールを適用するか、ユーザーが判断する必要がある). さらに、片側の材料がもう片側に比べてかなりの量が削られるため、隣り合う Checkerboard の場合、フライスビットが届かないような狭い部分ができてしまう (図 6d). そこで、Checkerboard を全面的に禁止することにした.

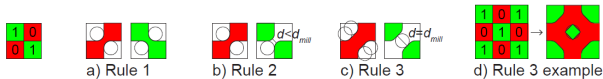


図 6. Checkerboard Pattern.

方向制約 (図 7) として、各木材が単一方向のみから加工されるという制限を導入している. さらに、単一方向から加工されたジョイントは、必ずその方向にスライドさせることができる (図 7a). この性質を利用して問題を簡単にするために、ジョイントのすべての材木のスライド軸は 1 つだけであり、製作軸とスライド軸は共有されているという制限を設けた. これにより、組み立てられた状態で 2 本の木材 (最初の木材と最後の木材) だけがスライドして出てくるような形状を実現することができる (図 7b).

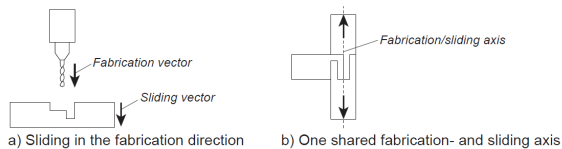


図 7. 加工方向制約.

4.2 性能指標

8 つの性能指標は以下のように計算される.

a) **Connectivity.** 木材のすべての固定端から始まる塗り潰しアルゴリズムを実行し、木材に属するすべてのボックスをカバーしているかどうかを判断す

る. カバーされたボックスは接続され、カバーされていないボックスは接続されない.

b) **Bridging.** ブリッジングは、2 つの固定端を持つ材木について評価される. 木材の 1 つの固定端から始まる塗り潰しアルゴリズムを実行する. 2 番目の固定端に隣接するボックスが含まれる場合、ジョイントはブリッジされる.

c) **Milling direction.** 2 本以上の材木がある場合、中間の材木が製作可能かどうかを検証する. 中間材は、スライド軸に沿った 2 つの方向のうちの 1 つ (上からか下からか) からミリングする必要がある. システムは自動的に適切な加工方向を決定する. 中間材を両方の方向から加工する必要がある場合、その形状は無効であると判断される.

d) **Checkerboard.** 内側のすべての頂点について、製作軸に垂直な平面上の 4 つの隣接する頂点を分析する. 交差する対角線が 2 本ある場合、市 checkerboard と判定され警告が表示される (図 8a). 対角線が 1 つしかなく、他の 2 つのボックスが異なる材木に属している場合は、checkerboard ではないと判定される (図 8b).

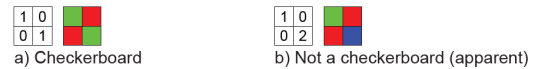


図 8. Checkerboard の解析.

e) **Slidability.** 直交する 6 つのスライド方向をそれぞれ個別に評価する. 各木材 ID と、テストされている方向に整列した各ボックスの列について、その方向で異なる ID のボックスの後に、同じ ID のボックスがあるかどうかを確認する. 同じ ID のボックスがあった場合ボックスは衝突を起こすため、木材がその方向にスライドするのを防ぐ.

f) **Durability.** 材の繊維方向を分断するような加工は、材の耐久性を低下させると判断されユーザに提示される. なお材の繊維方向と長手方向は一致していると仮定する (図 9).

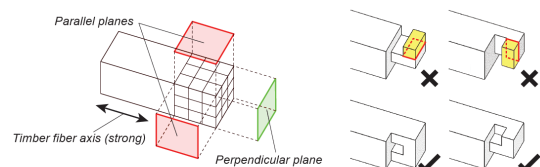


図 9. 耐久性の解析.

g) **Contact area.** 各木材について、他の木材に隣接する外面の面積の合計を計算する (図 10a).

h) **Frication area.** 各木材について、他の木材に隣接する外面の面積と、遮断されていないスライド方向に垂直な面でない外面の面積の合計を計算する

(図 10b). 接触面積と同じ原理で、摩擦面積が最も小さいスライド可能な木材が接合部の摩擦面積を表す。

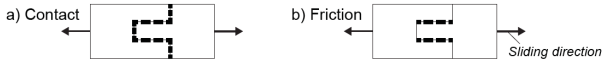


図 10. 接触面積と摩擦面積.

4.3 パス計算

ツールパスは各木材の 3 次元バイナリマトリクスから直接生成される。ジョイントは、ボクセルの最上層から層ごとに削り取られる。まず、ボイド領域が検出される (図 11a)。ボイド領域とは、接続されたボクセルのうち、除去すべき領域のことを指す。ボイド領域を囲む材料に沿って、内側にオフセットした最終パスを作成する (図 11b)。ミーリングビットの中心はパスに沿って移動し、その半径の長さに応じて両側の材料を除去する。したがって、パスは材料の端からフライスビットの半径分だけオフセットされる。



図 11. パス計算アルゴリズム.

そして、最終パスの外側の角を条件付きで丸める (図 11c)。これが、ジョイントの組立性を確保するアルゴリズムの重要な機能である。外側の角は、相手材の内側の角に位置している場合、つまり、隣接する 2 つの空のボクセルが共通の材で占められている場合に丸められる (図 12a)。そうでない場合、2 つの隣接する空のボクセルが異なる木材で占められていれば、角は丸められない (図 12b)。最終パスを作成した後、最終パスでカバーされていない空ボクセル領域の範囲は、共線的な振動荒加工パスで追加切削される (図 11d)。ボイド領域の最終的なツールパスは、最終パスと粗加工パスを組み合わせたものである (図 11e)。そして、アルゴリズムは、すべての空のボクセルがカバーされるまで、次の領域、そして次の層へと進む。

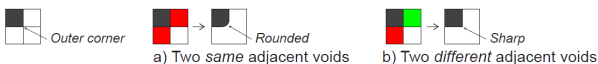


図 12. 接触面積と摩擦面積.

5 結果

本システムの有用性と能力を示すために、実際に製作された、もしくはグラフィックとして展示された機能的な家具やその他の組立品を紹介する。図 13

は、本システムを用いて製作した椅子である。この椅子には 9 つのジョイントがあり、その内訳は 5 つの 2 本から成るジョイントと 4 つの 3 本からなるジョイントである。ジョイントは摩擦のみで固定されており、人が座っても安定している。図 14 はテーブルで、L 字型、斜め T 字型、X 字型など 14 個のジョイントがある。



図 13. 椅子の製作例.



図 14. テーブルの製作例.

様々な継ぎ手の種類、パラメータ、技術的特性を示すために、いくつかのサンプルを設計し、製作した。図 15 は、2 本から成るティンバージョイントの向きや位置がすべて異なる接合部の例である。さらに、3 本、4 本の木材が交差するジョイントも製作した (図 16)。また、他の解像度を試すために、デフォルトではない設定でジョイントを設計、製作した。最も低い解像度である $2 \times 2 \times 2$ では、実現可能性が非常に低く、有効なジョイントもほとんどない (図 17a)。最高解像度の $5 \times 5 \times 5$ では、面数の多いモデルでは少々手間はかかるが、バラエティに富んだ高摩擦の関節を作ることができた (図 17b)。また、斜めの接合部を作ることによって交差角のパラメータを実証し (図 18a)、正方形ではない断面の木材でジョイントを作ることによって高さや幅の寸法パラメータを実証した (図 18b)。

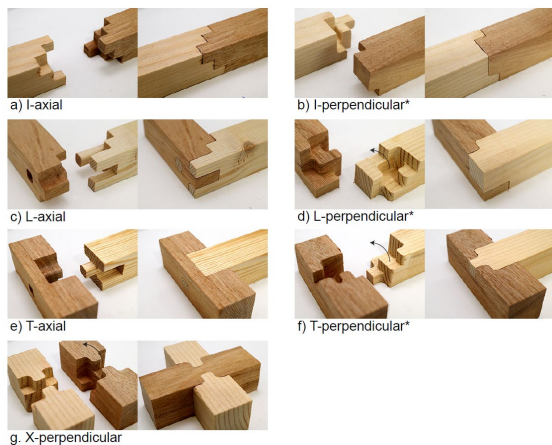


図 15. 様々な2本のジョイントの製作例.

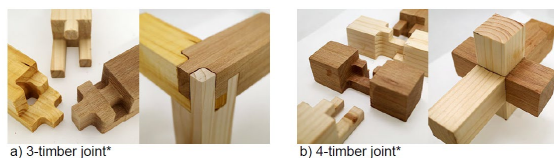


図 16. 3本および4本のジョイントの製作例.

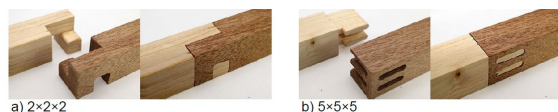


図 17. 異なる解像度の製作例.



図 18. 斜めおよび非正方形ジョイントの製作例.

組立品は、45x45mm の木の棒を 10mm のフライスビットで加工した。接合サンプルは、30x30mm の明るい色と暗い色の木の棒を 90mm の長さで加工したもので、一部は塗装した。特に理由のない限り、フライスは直径 6mm のものを使用した。使用したのは、Pro Spec Tools 社の 3 軸 CNC フライス、モデル PSF240 である。フライス加工に要した時間は、接合部の形状と木材の寸法に応じて、1 本あたり 12 ~ 25 分であった。機械の原点を手動で設定する際の誤差は、実際の材料に比べてやや小さめの幅を入力することと、ジョイントを組み立てた後に側面をやすりがけすることで対処した。

6 まとめ

フレーム構造用の木材ジョイントを設計・製作す

るためのインタラクティブなシステム「Tsugite」を提案した。将来的には、ジョイント単体のデザインだけでなく、構造体全体の設計プロセスを統合することが有効であると考えられる。

謝辞

本研究は、JST ACT-I JPMJPR17UT, JSPS KAKENHI 17H00752, JST CREST JPMJCR17A1 による支援を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] Patrick Baudisch, Arthur Silber, Yannis Kommana, Milan Gruner, Ludwig Wall, Kevin Reuss, Lukas Heilman, Robert Kovacs, Daniel Rechlit, and Thijs Roumen. 2019. Kyub: A 3D Editor for Modeling Sturdy Laser-Cut Objects. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19). ACM, New York, NY, USA, Article 566, 12 pages. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/3290605.3300796>
- [2] Chi-Wing Fu, Peng Song, Xiaoqi Yan, Lee Wei Yang, Pradeep Kumar Jayaraman, and Daniel Cohen-Or. 2015. Computational Interlocking Furniture Assembly. ACM Trans. Graph. 34, 4, Article 91 (July 2015), 11 pages. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/2766892>
- [3] Jochen Gros. 2020. 50 Digital Wood Joints by Jochen Gros. (2020). <http://winterdienst.info/50-digital-wood-joints-by-jochen-gros/>
- [4] Alec Jacobson. 2019. RodSteward: A Design-to-Assembly System for Fabrication using 3D-Printed Joints and Precision-Cut Rods. Computer Graphics Forum (2019).
- [5] Kenji Kanasaki and Hiroya Tanaka. 2013. Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication. Computation and Performance - Proceedings of the 31st eCAADe Conference 1 (2013), 711-717. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:d36152ad-7cfc-44b6-bdfe-654f159a3e65>
- [6] Robert Kovacs, Anna Seufert, Ludwig Wilhelm Wall, Hsiang-Ting Chen, Florian Meinel, Willi Müller, Sijing You, Yannis Kommana, and Patrick Baudisch. 2017. Demonstrating TrussFab: Fabricating Sturdy Large-Scale Structures on Desktop 3D Printers. (2017), 445-448. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3027063.3050427>
- [7] Maria Larsson, Hironori Yoshida, and Takeo

- Igarashi. 2019. Human-in-the-loop Fabrication of 3D Surfaces with Natural Tree Branches. In Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication (SCF '19). ACM, New York, NY, USA, Article 1, 12 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3328939.3329000>
- [8] Danny Leen, Tom Veuskens, Kris Luyten, and Raf Ramakers. 2019. JigFab: Computational Fabrication of Constraints to Facilitate Woodworking with Power Tools. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19). ACM, New York, NY, USA, Article 156, 12 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3290605.3300386>
- [9] Yijing Li and Jernej Barbič. 2014. Stable Orthotropic Materials. In Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA '14). Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 41–46. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2849517.2849524>
- [10] Shiran Magrisso, Moran Mizrahi, and Amit Zoran. 2018. Digital Joinery For Hybrid Carpentry. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). ACM, New York, NY, USA, Article 167, 11 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173741>
- [11] Saigopal Nelaturi, Gregory Burton, Christian Fritz, and Tolga Kurtoglu. 2015. Automatic Spatial Planning for machining Operations. In Proceedings of The eleventh annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2015). Gothenburg, Sweden. nel-bur-fri-kur-case2015.pdf
- [12] Robert J. Ross. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [13] Peng Song, Chi-Wing Fu, and Daniel Cohen-Or. 2012. Recursive Interlocking Puzzles. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2012) 31, 6 (December 2012), 128:1–128:10.
- [14] Peng Song, Chi-Wing Fu, Yueming Jin, Hongfei Xu, Ligang Liu, Pheng-Ann Heng, and Daniel Cohen-Or. 2017. Reconfigurable Interlocking Furniture. ACM Trans. Graph. 36, 6, Article 174 (Nov. 2017), 14 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3130800.3130803>
- [15] Rundong Tian, Sarah Sterman, Ethan Chiou, Jeremy Warner, and Eric Paulos. 2018. MatchSticks: Woodworking Through Improvisational Digital Fabrication. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). ACM, New York, NY, USA, Article 149, 12 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173723>
- [16] Nobuyuki Umetani, Takeo Igarashi, and Niloy J. Mitra. 2012. Guided Exploration of Physically Valid Shapes for Furniture Design. ACM Trans. Graph. 31, 4, Article Article 86 (July 2012), 11 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2185520.2185582>
- [17] Nobuyuki Umetani and Ryan Schmidt. 2013. Cross-sectional Structural Analysis for 3D Printing Optimization. In SIGGRAPH Asia 2013 Technical Briefs (SA '13). ACM, New York, NY, USA, Article 5, 4 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2542355.2542361>
- [18] Ziqi Wang, Peng Song, and Mark Pauly. 2018. DESIA: A General Framework for Designing Interlocking Assemblies. ACM Trans. Graph. 37, 6, Article 191 (Dec. 2018), 14 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3272127.3275034>
- [19] Chenming Wu, Haisen Zhao, Chandrakana Nandi, Jeffrey I. Lipton, Zachary Tatlock, and Adriana Schulz. 2019. Carpentry Compiler. ACM Trans. Graph. 38, 6, Article Article 195 (Nov. 2019), 14 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3355089.3356518>
- [20] Yuan Chieh Yang. 2016. Classical Through Digital. (2016). <https://space10.com/project/classical-through-digital/>
- [21] Jiaxian Yao, Danny M. Kaufman, Yotam Gingold, and Maneesh Agrawala. 2017. Interactive Design and Stability Analysis of Decorative Joinery for Furniture. ACM Trans. Graph. 36, 2, Article 157a (March 2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3054740>
- [22] Hironori Yoshida, Maria Larsson, and Takeo Igarashi. 2019. Upcycling Tree Branches As Architectural Elements Through Collaborative Design and Fabrication. In Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '19). ACM, New York, NY, USA, 589–593. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3294109.3295639>
- [23] Maria Larsson, Hironori Yoshida, Nobuyuki Umetani, Takeo Igarashi. Tsugite: Interactive Design and Fabrication of Wood Joints. UIST 2020.