

IMU 搭載ジョイントを用いた三次元形状構成

菊地高史^{†1} 杉浦裕太^{†1} 五十嵐健夫^{†2} 杉本麻樹^{†1}

概要: 本研究では、室内サイズオブジェクトの実スケールでの三次元形状構築のための手法として、ジョイントとポールを用いた手法を提案する。ユーザはジョイントモジュールとポールを接続していくことにより形状を構築する。本研究では、慣性計測装置 (IMU) を用いて、作成した実モデルを回転することにより形状を推定する手法を提案する。回転の工程として2つ存在する。実モデル全体を回転し形状を推定する工程と、推定した形状同士をつなぐ接続工程。2つの工程を組み合わせることにより形状を構築する。

3D Modeling with Physical Joint Module with IMU

TAKASHI KIKUCHI^{†1} YUTA SUGIURA^{†1} TAKEO IGARASHI^{†2}
MAKI SUGIMOTO^{†1}

Abstract: In this paper, we introduce wire-frame based digital fabrication method for room sized objects such using joints and poles. The user can create virtual 3D model of the room size object by connecting physical joint modules with poles. We propose a method to both recognize the connection and calculate the position of the joints by using only 9-axis inertial measurement unit (IMU). The user can make arbitrary joints such as existing or 3D printed joints into fabrication tools by attaching the IMU. We observed that the user could make virtual models of room sized objects with our system.

1. はじめに

3D プリンタやレーザーカッターの普及により、個人によるものづくりが容易になった。デバイスのプロトタイプ作成や雑貨の作成など幅広く行われている。個人製作の利点として、大きさや形などをユーザが自由に決められることが挙げられる。一般的に、3D プリンタなどの機器を用いたものづくりを行うには、CAD ソフトウェアなどコンピュータ上でデジタルに設計する。CAD モデルは、一度作成すれば何度も再利用できるほか、AR や VR のアプリケーションにも応用することができる。一方で、CAD ソフトウェアを用いた設計では、知識や経験が必要となるため、未経験者が3次元モデルを自由に設計することは難しい。そのため、3次元形状を直感的に作成する研究が盛んに行われている。

直感的にモデリングを行う方法として、現実世界の物体をインタフェースとして入力する Tangible User Interface の研究がある。TUI を利用したモデリングの利点として、ユーザが直接物体に触れながら設計できるため、設計中の物体の形や大きさや角度などの位置関係が容易にわかることが挙げられる。また、従来のものづくりの工程と近いため、未経験者でも詳しい説明なく容易に設計可能である事も挙



図1. 作成の様子と作成されたモデル (椅子)

Figure 1. Created Model (chair)

げられる。

代表的な手法としてタンジブルなブロックを用いて3次元形状入力する方法がある。現実世界でブロックを積み上げ、その状態をセンシングすることで3次元形状を構築する。ブロックを用いた手法では、テーブルトップサイズの物体の作成や細かいディテールのデザインを作成することに適している一方で、1つ1つ積み上げて作成するため、大きなものを実スケールで作成することには不向きである。

^{†1} 慶應義塾大学
Keio University.

^{†2} 東京大学
The University of Tokyo

ジョイントとポールを用いたものづくりでは、ワイヤフレーム状の枠組みの作成などに用いられ、大きい物の外形を作ることに適している。内部までしっかり作ることも物体の外形情報が重要な場合に有効なツールである。

本研究では、室内サイズオブジェクトの三次元形状構成手法としてジョイントとポールをファブリケーションツールとした手法を提案する。ユーザがジョイントとポールを用いて作成した実世界のモデルに対して、同様の VR モデルを作成するインタフェースを作成する。

2. 関連研究

2.1 自由形状物体を使った形状入力

コンピュータを利用し、3次元形状モデルの作成を行う手法として、実世界に存在するも物体を用いた入力インタフェースが活用される。自由形状物体を使った形状入力の研究として、Follmerらは、粘土状インタフェースに既存物体を押し付けることで、奥行きを持った2.5次元のモデルを作成している[5]。さらに、3次元モデルの作成手法として、Wiechelらによる複合現実環境での設計の研究がある[14]。現実世界の物体をスキャンしてコンピュータ上での設計に反映する他、逆にコンピュータ上のモデルを、ハーフミラーを用いて現実世界の物体に重畳するなど直感的に設計することができる。

また、形状の作成だけでなく、3次元モデル変更の手法として、Songらは、CADモデルと同様のモデルを、デジタルペーパーを用いて作成し、紙に変更点を記入することでCADモデルに反映するという研究がある[12]。これらの研究が示すように、既存物体を活用した設計手法は、コンピュータ上での設計と比べて直感的であるため、わかりやすさや時間短縮などの効果が見られる。

2.2 ブロックを使った三次元形状入力

ブロック型UIは積み木という玩具が存在するように、専門的な知識のないユーザでも容易に形状を作成することができる。

ブロックを入力とした3次元モデル作成の研究として、外部カメラを用いてブロックを認識して形状を構成する手法がある。Baudischらはガラスファイバーとマーカーで出来たブロックを下から撮影することにより、積み上げた高さを認識している[4]。他にも、深度カメラを用いてブロックの形状を認識し、コンピュータ上で形状を構築する手法も存在する。

ブロックを入力とした3次元モデル作成の研究として、伊藤らによる、リアルタイムに3次元形状モデリングとインタラクションの行えるキューブ型UIの研究がある[9]。この研究では、リアルタイムにキューブブロックの接続状況を認識し、形状を構成している。また、Andersonらブロックによる設計と映像による補間を組み合わせた[2]。他にも、安藤らは、表面に赤外線ledとフォトトランジスタを

敷き詰めた積み重ね形状認識可能なブロック型UIを開発した[3]。これにより、従来のブロック型UIでは認識や接続が困難であった任意位置や角度での接続を可能とし、より柔軟な形状が作成可能となった。しかし、これらの研究では、ものづくりに使用できる物体はあらかじめ決まっただけで、任意のブロックを入力インタフェースとして使用することはできない。

2.3 ジョイントとコンピューテーション

実世界でものづくりのツールとして一般的なもののひとつにジョイントがあり、Tinkertoyという玩具あるように専門知識のない人でも自由にものづくりが可能になる[13]。ジョイントは、いろいろなものをつなぐ道具として利用される他、3次元形状の骨格生成などにも使われる。ジョイントを利用した研究として、RaffleらによるTopoboと呼ばれるジョイント型の静的パーツと動的パーツを含んだツールがある[11]。このツールは、骨格モデルを作成するだけでなく、専門知識のない人でも自由にアクチュエート可能な3次元物体を作成することができる。また、Agrawalらは、把持型の接着テープ押出機を用いて様々な長さのポールを作り出し、ものづくりする研究を行っている[1]。ポールを次々に作成し、様々な場所にジョイントしていくことでワイヤフレーム状のプロトタイピングが可能となる。

既存物体をジョイントする研究として、小山らによる、3Dプリンタを用いて複数の物体をつなぐジョイントを生成する研究がある[10]。また、山田らは、既存物体を組み合わせることで3次元物体を構成する研究を行っている[15]。この研究では、予めものづくりに使用する物体の3次元形状を登録し、コンピュータ上で配置し、実世界でジョイントを用いて連結することで物体を構成している。3次元形状の作成だけでなく、入力としてもジョイントは活用されている。Jacobsonらは、jointを利用し、3次元キャラクターのアニメーション作成のためのtangibleな入力インタフェースを作成している[8]。この研究では、3次元キャラクターの形状にジョイントをつなげて動かすことにより、コンピュータ上でキャラクターも同様に動かすことができ、アニメーション作成を行っている。

これらの研究が示すように、ジョイントはあらゆるものづくりにおいて利用されるツールであるといえる。しかし、ジョイントを3次元物体の作成など既存の3次元モデルに対してアクションを起こす研究は存在するが、3次元形状の入力のインタフェースとしてはあまり活用されていない。

2.4 加速度センサを用いたジェスチャ同期手法

様々な機器を同期するための手法として加速度センサでジェスチャを認識し同期する手法がある。“Smart-Its Friends”という技術では、2つのデバイスを振った際の動きを認識し、同期している[7]。この手法では、振った際の動きのパターンで近いものを見つけることでマッチングを行っている。また、Hinkleyらは、このコンセプトを拡張

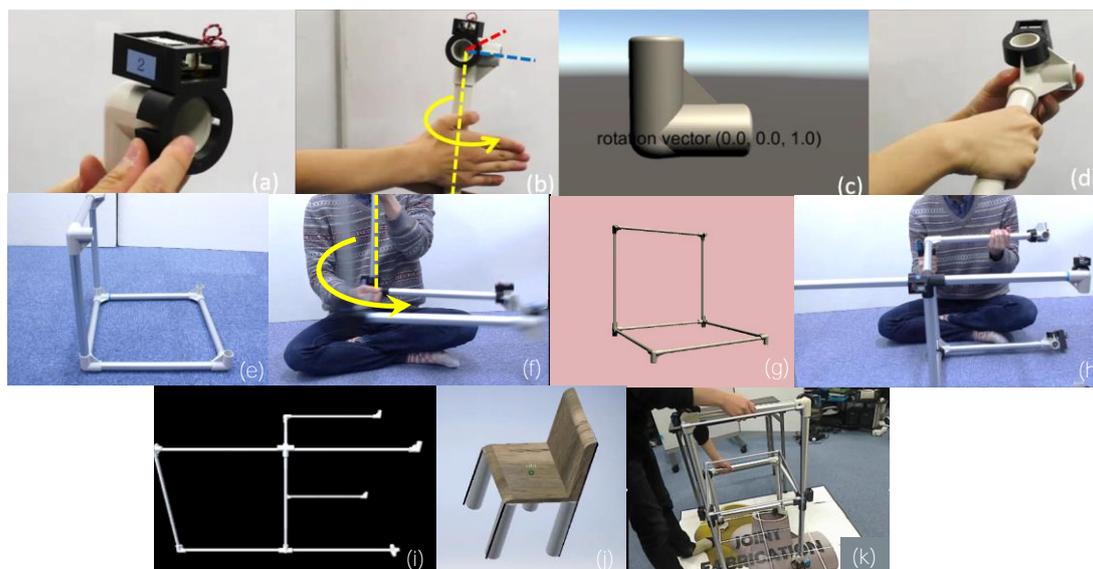


図2. 構築の流れ. IMU モジュールをジョイントに装着し(a)、ジョイント形状を登録する(b, c). 登録後、ジョイント同士をポールで接続することで形状を構築できる(d). 作成したモデル(e)を、基準点を中心に3軸以上で回転する(f)ことで形状が推定できる(f). 推定したパーツ同士を接続工程にて接続する(h, i). 形状構築後、作成されたデジタルモデルを基にCADで細かいデザインを加えることができる(j)他、実モデルを入力としデジタルモデルに作用できる(k).

Figure 2. Flow of the fabrication. User attach an IMU to the joint (a) and register the joint type (b, c). After registration, user can start creating the model by connecting joints with poles (d). The shape of the model can be estimated by rotating the model (e,f).

The model can be connected afterwards (h,i). User can use the digital model to create design with CAD and control the digital model using the model created.

し、二つのタブレット PC の同期を行っている[6]. 二つのタブレット端末を振るのではなく、軽くぶつけることで、ぶつかった際の動きを解析し、認識を行っている。私たちは、これらの手法を拡張し、複数のジョイントの接続関係の認識を行う。

3. ジョイントを用いた三次元形状構築

本研究では、9軸IMUを搭載したジョイントモジュールを用いた三次元形状構築手法を提案する。また、モデルを回転することで形状を推定する手法を提案する。

形状構築には2つの回転工程を用いる。1つ目が、モデル全体を回転することで形状を推定する推定工程。2つ目が2個のジョイントを回転することで接続関係を認識する接続工程。推定工程で認識したパーツ同士を接続工程によって結合するといったように、2種類の回転工程を組み合わせることで形状を構築する。

3.1 ジョイントの登録

使用する前にユーザは、各センサモジュールがどの種類のジョイントに取り付けられているのかを知る必要がある。そのために、ユーザはジョイントの登録工程を実行する必要がある。

まず、主要なジョイントの形を含んだデータベースを作成した。ジョイントの種類ごとに穴の数と穴の方向ベクトルの情報を保持する。このデータベースの情報と比較する

ことで、ジョイントの種類を識別する。

ジョイント種類の登録方法として、ジョイントの各穴にポールを挿しポールを軸に回転することでジョイントの種類を認識する。ポールを軸に回転することで、回転軸と穴の方向ベクトルが一致する。そのため、すべての穴で回転することで、ジョイントのすべての穴の方向ベクトルを取得できる。それらのベクトルを用いて、予め登録してあるジョイントの情報とマッチングを行うことにより、センサモジュールとジョイントの種類の対応付けが行える。また、この方法を用いて、新たな種類のジョイントをデータベースに登録することも可能である。

3.2 推定工程

3.2.1 回転による三次元位置推定

推定工程では、モデル全体を回転することで形状を推定する。ある基準となるジョイントを決め、そのジョイントから様々な軸で回転した際の加速度から計算する。速度・加速度の関係式と回転運動における速度の式から回転時の加速度の大きさは、回転軸からの距離によって決まる。そのため、回転軸からの距離と加速度の間には相関がある。基準ジョイントを中心に3軸以上で回転することにより、ジョイントの3次元位置を推定する。

ポールを回転した際の加速度と距離の関係を調べるために、ジョイントモジュールを取り付けたポールを回転台で、手動で回転し検証した。形状は、直線状に並べたもの

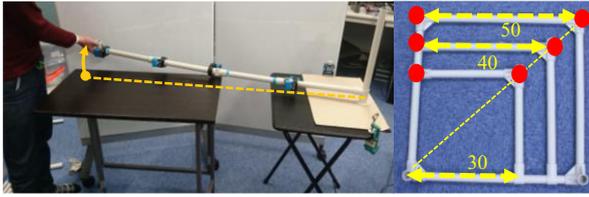


図3. ポールを回転した際の距離と加速度の関係の検証。検証の様子（左上）、格子状に配置した際の測定位置（右上）、直線時の結果（中）、格子状時の結果（下）

Figure 3. Relationship between the distance and the acceleration. The experiment condition (top). The result for linear shape (middle) and the result for square (bottom).

（計測位置：40cm, 50cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm, 160cm の計 7 箇所）と格子状（計測位置：図 3 右上の赤丸 計 6 箇所）で行った。ポールを 30 秒間回転し、3 秒ごとの中央値を変数とした。試行は 10 回行った。

結果は図 3 に示した。直線状・格子状ともに距離と加速度の間に比例関係が見られた。また、傾きに注目した場合、直線状・格子状の両方で同等の傾きが得られた。このとき得られた結果を基に距離と加速度のモデルを作成した。

3.2.2 ジョイント形状による拘束

加速度センサの値から直接正確な 3 次元位置を計算することは困難である。その要因として、加速度センサは、常に重力加速度の影響を受けていることに加え、ノイズが乗るためである。そこで、ジョイント形状による拘束を与える。基準ジョイントを始めとし、ジョイントの形状と姿勢から次に接続可能な位置を算出する。ここで、前提条件として、ジョイントは穴を介して、他のジョイントと接続し

ているものと仮定する。この仮定の下では、各ジョイントは他のジョイントの穴の方向ベクトルの延長線上に存在する。

このことを踏まえると、ジョイントの姿勢方向と形状が既知であるとき、回転軸からのおおよその距離が定まることで接続位置を認識可能である。ジョイントの姿勢は、ジャイロセンサ、加速度センサ、地磁気センサの値から Madwick フィルタを用いて計算した。IMU の姿勢とジョイント形状からジョイントの穴の位置を空間的に把握できる。次のジョイントが決まった際に、同様に再度接続可能位置を算出しマッチングを繰り返すことで形状を構築する。

3.2.3 加速度センサの値から距離への変換

加速度センサの値は、速く回したときは大きく、ゆっくりのときは小さくというように、振り速度に影響される。そのため、全てのジョイントの加速度値の比として扱う。これにより、振り速度の影響を少なくする。加速度比から距離への変換では、基準点から相対位置が既知であるジョイントのセンサ値で正規化する。

3.3 接続工程

ジョイント間の接続認識には、2 つのジョイントを接続したポールを回転軸に回転することで認識する。ポールを回転軸にすることで、回転軸と接続された穴の方向ベクトルが一致する。そのため、IMU から取得できる角速度ベクトルから 2 つ穴の方向ベクトルを取得できる。この方法を用いることで、穴の方向が IMU の回転軸と一致しない場合にも認識可能である。推定工程で推定したパーツ同士を接続工程で接続することにより、モデル全体を回転しづらい大きいものも作成可能となる。

4. 実験

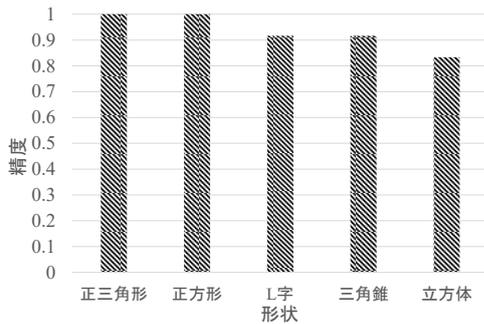
本システムの形状認識精度を評価するために精度実験を行った。2 種類の実験を行った。1 つ目が形状推定の精度を測定した。2 つ目が距離推定の精度を測定した。本手法のプロトタイプは Unity で実装した。

4.1 形状推定精度

4.1.1 実験条件

複数の基本形状を回転し、形状推定した際の精度を調べた。作成した形状は、三角形、四角形、L 字（立体）、三角錐、立方体の計 5 種類。試行は、各形状 12 回ずつ行い、回転軸は 3 軸ずつ 15 秒以上回転した際の回転情報を基に推定した。また、回転軸は任意に設定し、IMU の角速度ベクトルを基に算出した。ジョイントの配置も作成の手順も任意で行った。ただし、ポールの長さは全て 40cm で統一した。

評価項目としては、形状の正否とジョイント位置の正否を評価した。そのため、形状が正しく認識されていてもジョイントの位置が正しくないものは誤っていると判断した。



| 出力 入力 | 30cm | 40cm | 50cm | 60cm |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 30cm | 87.5% | 12.5% | 0.0% | 0.0% |
| 40cm | 0.0% | 83.3% | 16.7% | 0.0% |
| 50cm | 0.0% | 0.0% | 87.5% | 12.5% |
| 60cm | 0.0% | 0.0% | 20.8% | 79.2% |

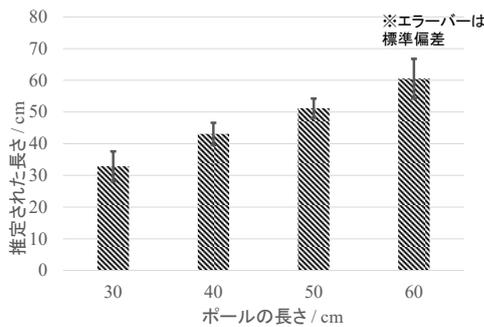


図 4. 実験結果. 形状推定精度実験の結果 (上). 距離推定精度の結果 (中). 距離推定の際の値のばらつき (下)

Figure 4. Results of the Experiment. Result of the shape recognition (top). Result of distance recognition (middle). Distance measured (bottom).

4.1.2 実験結果

実験結果を図 4 (上) に示す. すべての形状で 8 割以上の精度で形状とジョイント位置を識別できた. 中でも正三角形と正方形のように 2 次元平面で構成される図形では高い識別率であった. しかし, 立方体など基準ジョイントからの距離が遠くなるにつれ, 形状は正しく認識されているが, ジョイント位置が誤認識されているケースが発生していることが分かった.

4.2 距離推定精度

4.2.1 実験条件

複数の長さのボールで構成された直方体を回転し, 推定されたボールの長さの精度を測定した. 条件として, 形状は既知であり, ジョイントの位置は固定で行った. 作成した直方体は, 基準となる x 軸は 40cm で固定し, y,z 軸を 4

種類の長さのボールで作成した. y,z 軸は同じ長さのボールで作成した. ボールは 30cm, 40cm, 50cm, 60cm の計 4 種類で行った. 試行回数は, すべての形状で 12 回ずつ. 回転軸は x,y,z の 3 軸で各 15 秒ずつ回転した. 推定された距離を基に 4 種類 (30cm, 40cm, 50cm, 60cm) の長さのクラスに分類した.

4.2.2 実験条件

実験結果を図 4 (中) に示す. 形状が既知のとき, すべての距離で 8 割程度の識別率で推定できることが確認できた. また, すべての距離において, 20cm 以上違うクラスに分類されることは一度もなかった.

距離推定した際の値のばらつきを図 4 (下) に示す. グラフのエラーバーは標準偏差を表している. エラーバーを比較すると, 識別率が 8 割を超えていた 30cm, 40cm, 50cm では, ばらつきが小さかったのに対し, 8 割以下であった 60cm では, ばらつきが大きく, 複数のクラス間で値がばらついていることが分かった. これは, 距離が長くなると回転軸がぶれやすいためだと考えられる.

5. 作成したモデルの活用

5.1 CAD ソフトウェアへの導入

デジタルモデルを構築後, 作成されたモデルを CAD ソフトウェアへ導入することにより, 細部のデザインを構築することができる (図 2j). 導入されたモデルは, 骨格モデルとしてデザインの一部として活用できるほか, 自作モデルのガイドラインとして利用することができる. 室内オブジェクトのモデルを実スケールで作成できるため, ユーザは大きさなどの幾何学関係を容易に捉えることができる.

5.2 作成した実モデルを入力としたアプリケーション

IMU をデジタルモデルの形状構築のためだけでなく, 作成したデジタルモデルに動きを反映することができる (図 2k). IMU の姿勢情報や加速度などをデジタルモデルに反映し, 実モデルと同様に動かすことができる. そのため, 実モデルを入力とし, コンピュータ内のデジタルモデルを操作することが可能であり, 他のアプリケーションへと応用が可能となる.

6. 適応制限

本研究の手法では, ユーザに回転軸を重力方向に向け, 回転してもらおうといった回転方向の制限がある. これは, 重力加速度の影響を受けないためである. 回転方法を変えた際には, また違った加速度と距離の関係が存在するため, 回転方法は現段階では固定である.

また, ジョイントの種類にも制限がある. 本手法では, ジョイントの種類の認識は, ボールを穴に挿し回転することで行う. そのため, 穴の方向が可変であるジョイントを使うことはできない. また, 同じ回転軸方向に複数の穴が場合でも認識することができない.

7. おわりに

本研究では、室内サイズオブジェクトの実スケールでの三次元形状構築手法として、ジョイントとポールをインタフェースとした手法を提案した。本手法では、IMUをジョイントに装着し、回転動作を基にジョイント同士の接続関係を認識する。また、本手法を用いて作成されたモデルから拡張可能性を示した。

今後の展望として、ジョイントやポールを活用し、より実践的なデザイン設計の支援を行うことを考えている。本研究では、ジョイントとポールが物体の骨格モデルを作成することに有効であることを示した。実世界のモデルにテクスチャを与えるなど、細部のデザインも可能なシステムへの発展を検討している。

参考文献

- [1] Harshit Agrawal, Udayan Umapathi, Robert Kovacs, Johannes Frohnhofen, Hsiang-Ting Chen, Stefanie Mueller, and Patrick Baudisch. 2015. Protopiper: Physically Sketching Room-Sized Objects at Actual Scale. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST'15), 427-436.
- [2] David Anderson, James L. Frankel, Joe Marks, Aseem Agarwala, Paul Beardsley, Jessica Hodgins, Darren Leigh, Kathy Ryall, Eddie Sullivan, and Jonathan S. Yedidia. 2000. Tangible interaction + graphical interpretation: a new approach to 3D modeling. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '00), 393-402.
- [3] Masahiro Ando, Yuichi Itoh, Toshiki Hosoi, Kazuki Takashima, Kosuke Nakajima, and Yoshifumi Kitamura. 2014. StackBlock: block-shaped interface for flexible stacking. In Proceedings of the adjunct publication of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST'14 Adjunct), 41-42.
- [4] Patrick Baudisch, Torsten Becker, and Frederik Rudeck. 2010. Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10), 1165-1174.
- [5] Sean Follmer and Hiroshi Ishii. 2012. KidCAD: digitally remixing toys through tangible tools. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12), 2401-2410.
- [6] Ken Hinckley. 2003. Synchronous gestures for multiple persons and computers. In Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '03), 149-158.
- [7] Lars Erik Holmquist, Friedemann Mattern, Bernt Schiele, Petteri Alahuhta, Michael Beigl, and Hans-Werner Gellersen. 2001. Smart-Its Friends: A Technique for Users to Easily Establish Connections between Smart Artefacts. In *Proceedings of the 3rd international conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '01)*, 116-122.
- [8] Alec Jacobson, Daniele Panozzo, Oliver Glauser, Cédric Pradalier, Otmar Hilliges, and Olga Sorkine-Hornung. 2014. Tangible and modular input device for character articulation. *ACM Trans. Graph.* 33, 4, Article 82 (July 2014), 12 pages.
- [9] Yoshifumi Kitamura, Yuichi Itoh, and Fumio Kishino. 2001. Real-time 3D interaction with ActiveCube. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '01)*, 355-356.
- [10] Yuki Koyama, Shinjiro Sueda, Emma Steinhardt, Takeo Igarashi, Ariel Shamir, and Wojciech Matusik. 2015. AutoConnect: computational design of 3D-printable connectors. *ACM Trans. Graph.* 34, 6, Article 231 (October 2015), 11 pages.
- [11] Hayes Solos Raffle, Amanda J. Parkes, and Hiroshi Ishii. 2004. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*, 647-654.
- [12] Hyunyoung Song, François Guimbretière, Chang Hu, and Hod Lipson. 2006. ModelCraft: capturing freehand annotations and edits on physical 3D models. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '06)*, 13-22.
- [13] TINKERTOY <http://www.knex.com/products/tinkertoy/>. [Online; accessed 2-September-2016]
- [14] Christian Weichel, Manfred Lau, David Kim, Nicolas Villar, and Hans W. Gellersen. 2014. MixFab: a mixed-reality environment for personal fabrication. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*, 3855-3864.
- [15] Suguru Yamada, Hironao Morishige, Hiroki Nozaki, Masaki Ogawa, Takuro Yonezawa, and Hideyuki Tokuda. 2016. ReFabricator: Integrating Everyday Objects for Digital Fabrication. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '16)*, 3804-3807.