JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	大規模新聞紙アートの制作支援
Author(s)	有原，啓介；中島，健斗；李，思成；吉田，匠吾；彭，以琛；謝，浩然；佐藤，俊樹；宮田，一乘
Citation	情報処理学会研究報告．CG，コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学，2021-CG-181(8)：1-8
Issue Date	2021-02-09
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/17063
Rights	社団法人　情報処理学会，有原 啓介，中島 健斗，李 思成，吉田 匠吾，彭 以琛，謝 浩然，佐藤 俊樹，宮田 一乘，情報処理学会研究報告．CG，コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学，2021-CG-181(8)，2021，pp.1-8．　ここに掲載した著作物の利用に関する注意：本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Vol.2021-CG-181 No.8
2021/2/16

大規模新聞紙アートの制作支援

有原啓介[1]　中島健斗[1]　李思成[1]　吉田匠吾[1]　彭以琛[1]　謝浩然[1]
佐藤俊樹[1]　宮田一乘[1]

概要：3D プリンタ等の造形技術が発展しているが，大規模造形はいまだ困難である．近年日用品を用いた大規模造形技術が幾つか提案されているが，大きな構成要素を用いることで造形物の詳細度を高くできないという課題が残っている．また，3D 作品制作における形状造形の難しさも課題の一つである．本研究は，形状を変化させやすく手に入りやすい新聞紙に着目し，一般ユーザでも大規模な立体作品を作ることができる 3D モデルをベースとした制作支援を提案する．提案手法では，作品の形状を維持するためのスケルトン構造や造形物の制作ガイダンスをユーザに提示し，複雑な形状の新聞紙アートを容易に制作できるように支援する．スケルトン構造は，複数の割り箸を 3D プリントした専用のコネクタで結合することで作成する．また，深度差分情報を造形中の制作物に投影することにより，積層構造で新聞紙の造形に必要なガイドを提示する．評価実験では，造形支援のためのガイダンスの優位性と，提案手法を用いてスケルトンを容易に作成できることを示した．

キーワード：大規模新聞紙アート，空間拡張現実，スケルトン，制作支援

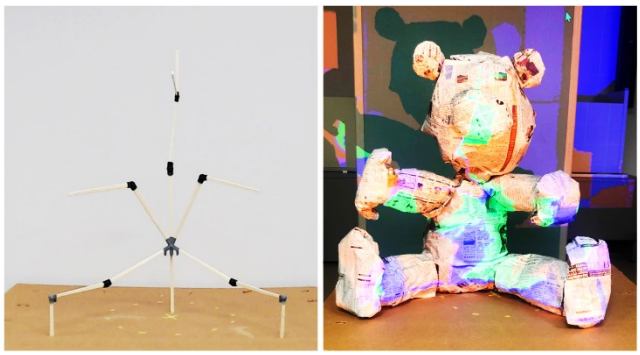
1. はじめに

手作業で造形物を作るという体験は，誰もが関わる機会のある芸術活動であろう．あるものの形を精巧に表現する，自身の内にあるイメージに基づいて作るなど，造形の動機や目的は様々である．しかし，形状を変化させやすい材料の代表である粘土や，彫刻に用いられる木材，石材などはコストが高い．したがって，作ろうとしている作品が大きくなるほど，必要な素材の量の確保が難しくなる．

アート作品の素材の一つとして，日常的に手に入りやすい新聞紙が挙げられる．新聞紙による造形物(以下，新聞紙アート)の例として，新聞紙を紐状や球状に丸めたものを多数つなぎ合わせることで動物の形を作ったものや，丸めた新聞紙をガムテープで巻くことで形状を整え，目的の形状を作るものなどがある．これらの新聞紙アートは，その作品が何をモデルとしているのかが十分に理解できるほどの詳細度を持ち，また比較的大きなものが多い．そこで本研究では，造形の素材として十分に変形させやすく，なおかつ作品の大きさを制限しにくい新聞紙に着目した．

また，造形を行う上で重要な事柄の一つが，思い通りに形を作れるということである．しかし，先に述べた新聞紙アートの作成手法においても，丸めた新聞紙を適切な位置に配置・接着するという工程が存在する．このように，想像の中の具体的な形状を作成者自身が現実に出力しなければならないという点は他の多くの造形手法と共通している．この工程は，訓練を積んでいない者にとっては難しい作業であり，思い通りの造形を行う妨げとなっている．そこで本研究では，目標形状と造形物との形状の差分を造形物に投影することにより，目標とする形状と造形物との差異をユーザに提示し，ユーザが思い通りの造形を行うことを支援するシステムを提案する．

また，新聞紙のような柔らかい材料を用いて大きな造形物を作る際には，自重による造形物の崩壊が問題となる．先に述べた新聞紙アートの作成手法では，丸めた新聞紙を密に接合したり，ガムテープを外骨格的に用いたりすることで強度を増していたが，初心者がそれらの手法によって十分に強度を確保できるとは限らない．そこで本研究では，支えとなる骨組み(スケルトン)の周囲に新聞紙を肉付けすることによって，強度を確保した造形物を作ることとする．そして，目的の形状に必要なスケルトンを，長さが統一された素材によって簡単に構築するための技術を提案する．このとき，スケルトンの構築を容易かつ低コストにするため，割り箸や硬質ポリ塩化ビニル管のような，安価で市販されており，長さが簡単に揃えられる物品を素材として用いる．



(a) 深度差による制作支援　　(b) 新聞紙造形物

図 1　大規模新聞紙アートの制作支援

2. 関連研究

2.1 プロジェクションマッピングを用いた制作支援

プロジェクションマッピングによる制作支援は様々な手法が提案されてきた．これは，プロジェクションマッピングが，ユーザの制作作業を妨げることなく，ガイドを示

1 北陸先端科学技術大学院大学　先端科学技術研究科

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

すことができるからである．Rivers ら[2]は，作業中の彫刻材料の深度情報を取得し，完成形に向けて各部分をどの程度彫るべきかというガイドを、彫刻の表面へのプロジェクションマッピングで示した．Xie ら[4]は，大規模なバルーンアートの積層構造に着目し，上方からの深度情報をもとにしたガイダンスを提案した．複数の層に分けたバルーンアートの各層へのキャリブレーションを行い，風船の過不足を示す数字を投影することで，視覚的に分かりやすいガイドを行った．

これに対し，本研究では，新聞紙造形を行う上で認識しづらい新聞紙の過不足の程度をユーザに示すためのガイドをプロジェクションマッピングで提示する．

2.2 3D プリンタを用いた制作支援

近年では 3D プリンタの普及により，任意形状の制作が容易になってきている．ただし，制作物の大きさと制作時間は，3D プリンタの機能によって制限される問題がある．この問題に対処するために，TrussFab[5]はモデルの大部分をペットボトルで構成するモデルの制作手法を提案した．ペットボトル同士の結合点となるコネクタにのみ 3D プリンタを用いることで，総合的なプリント所要時間を抑えることができる．RodSteward[1]は，ユーザが設計したロッドからなるモデルに含まれるコネクタのみに対して 3D プリンタを用いている．この手法では，設計されたモデルに応じて，構造の安定性やロッドの交差を考慮したコネクタを自動的に設計する．

これに対し，本研究では，スケルトンのためのコネクタの作成について，入力モデルより自動的に設計され，簡単にスケルトンを作成する手法を提案する．

3. 提案手法

本研究は，新聞紙アートの造形におけるスケルトン作成とプロジェクションマッピングを用いた制作支援ガイダンス手法について提案する．

3.1 システム概要

図 2 に示す新聞紙造形のワークフローにしたがい，全体の流れについて説明する．まず，造形目標の新聞紙で造形したい対象物の 3D モデル（以下，入力モデル）を入力する．スケルトンを作成するために，システムは入力モデルからスケルトン抽出を行う．本研究では，Mean Curvature Skeleton 手法[3]を用いてスケルトン抽出を行った．その後，割り箸や硬質ポリ塩化ビニル管などの安価で長さが揃えられている物品でスケルトンを作成するためにスケルトンを等直線に変換（以下，等直線変換）する．提案システムは，等直線変換されたスケルトンを用いて，コネクタの自動生成を行う．ユーザは，設計されたコネクタを 3D プリントし，そのコネクタでスケルトンに用いる物品を接合するこ

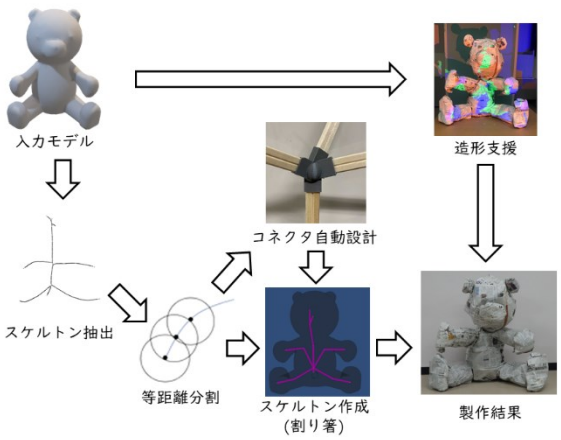


図 2　新聞紙造形技術のワークフロー

とで、容易にスケルトンを作成できる．作成したスケルトンへの造形には，深度情報を用いた支援を行う．制作支援には，制作モデルの表面に離散 3 色(赤，緑，青)が投影され，その色によってユーザに新聞紙造形の過不足を提示する．新聞紙の過不足は，設置された深度カメラによって取得される制作モデルの現在の深度マップとあらかじめ取得した入力モデルの深度マップから計算される．

3.2 等直線変換

等直線変換は入力モデルから抽出したスケルトンをグラフデータに変換する．スケルトンは頂点列で表されているため，空間をボクセル分割し，各ボクセルでサンプリングを行う．サンプリングされた頂点数に対して閾値を設定することで，閾値以上のボクセルの座標を代表する点(以下，代表点)として決定する．閾値はユーザによって定義され，本研究では，入力モデルの（高さ，幅，深さ）＝（30，25，20）に対し閾値＝2 でサンプリングを行った．次に，代表点間の距離を重みとする最小木を構築する．これは，それぞれの代表点から近傍の代表点を探索・結合することで求められる．探索範囲を広げながら，一つの木にすべての代表点が含まれるまで繰り返し探索を行う．

次に，最小木を用いてスケルトンの等直線変換を行う．等直線変換されたスケルトンは，エッジの長さがすべて等しいグラフであるため，最小木からエッジの長さが等しいグラフへの変換を考える．等直線変換は，変換される直線の長さを 1 とすると，あるノードを中心とした半径 1 の球の表面とグラフのエッジとの交点を求めることで等直線変換されたスケルトンのノードを求めることができる．等直

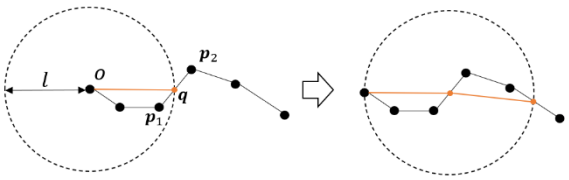
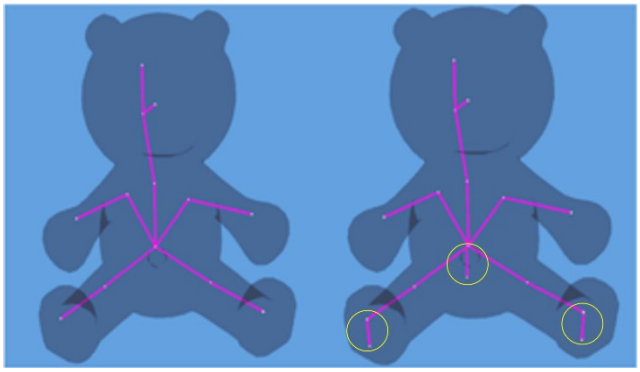


図 3　直線化の手順

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan



(a) サポートスケルトン無し (b) サポートスケルトン有り
(円内はサポートスケルトン)

図 4 サポートスケルトンの生成例

線変換の手順を図 3 に示す．ここでは，簡単に 2 次元平面上で説明する．まず，中心となるノード O を選択する．次に，ノード O を中心とした円とノードのペア$\{\boldsymbol{p}_1,\boldsymbol{p}_2\}$からなるエッジ e について，一方のノード$\boldsymbol{p}_1$が円内部，もう一方のノード$\boldsymbol{p}_2$が円外部となるようなエッジをノード O の近傍から探索を行う．エッジ e 上に交点$\mathbf{q}$が存在するため，以下の式(1)を得る．

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{p}_1 + t(\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1) \quad (1)$$

また，交点 $\mathbf{q}$ はノード O を中心とする円に接しているから

$$|\boldsymbol{q}|^2 = l^2 \quad (2)$$

したがって，二次方程式の解より以下を得る．

$$t = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3)$$

ただし，

$$A = |(\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1)|^2$$
$$B = 2(\boldsymbol{p}_1 \cdot (\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1))$$
$$C = |\boldsymbol{p}_1|^2 - l^2$$

ここで t はエッジ e 上に交点を取るように選択する．これを，求めた交点から再帰的に行うことで，最小木から等直線変換されたスケルトンを求めることができる．

3.3 サポートスケルトン

抽出したスケルトンは，入力モデルの中心を通っている場合がある．したがって，造形時にスケルトンを直接地面に置いてしまうと，造形する空間が失われてしまいスケルトンの下側への造形が困難となる場合がある．本研究では，これを解決するためにサポートスケルトンの生成を行った．サポートスケルトンの生成例を図 4 に示す．

まず，地面に接する方向を設定し，その方向へと近い順に等直線変換されたスケルトンのノードをソートする．次に，サポートスケルトンの本数分だけ，ソートされたノードから順にサポートスケルトンのベースとして選択する．ベースとして選択されたノードから凸包を作成し，モデルの重心が凸包内に存在するかを確認する．存在しない場合，重心に一番近いノードをサポートスケルトンのベースから除外し，新たにソートされたノードから選択する．モデルの重心が凸包内に存在するようになるまで，以上の操作を繰り返す．本研究では，重心は等直線変換されたスケルトンのノードの座標の平均を用いている．最後に，入力モデルのバウンディングボックスの地面方向の面まで届くようにベースのノードからスケルトンを作成する．このバウンディングボックスは各面とその方向の座標軸とが垂直であり，入力モデルを囲むような最小の直方体である．

3.4 コネクタ自動生成

立体的に交差・湾曲したスケルトンを実空間に手作業で構築するためには，スケルトンの各パーツ(ボーン)が交差する角度を正確に設定する必要があり，非常な困難が伴う．この課題に対し，スケルトンの各頂点においてボーンが交差する角度を考慮したコネクタを自動で設計し，3D プリントすることとした．なお，本研究ではコネクタの自動設計に Blender を用いたため，Blender が採用する Z-up の右手座標系に基づいて解説を行う．コネクタ自動設計の流れを図 5，実際のコネクタ自動設計と出力の様子を図 6 に示す．

スケルトン上の頂点 P に着目したとき，頂点 P が他の 2 つ以上の頂点と結合している，すなわち 2 つ以上のボーンが交差している場合に，頂点 P のためのコネクタを設計する．コネクタはボーンを保持するための差込口と，複数の差込口の間を取り持つための球(間質球)から成り立っており，最初に差込口の設計を行う．

最初に，差込口を X 軸と平行に生成する．このとき，差込口の底の中心が原点に位置するように生成する．次に，着目した頂点 P と結合している他の頂点 A との間のベクトル$\overrightarrow{PA}$を求め，$\overrightarrow{PA}$が XY 平面において X 軸となす角θ_xと，XYZ 空間において XY 平面となす角θ_{xy}を求める（図 7）．$\overrightarrow{PA} = (x_{PA}, y_{PA}, z_{PA})$のとき，$\theta_x$は$y_{PA} \geq 0$において$\theta_x \geq 0$，$y_{PA} < 0$において$\theta_x < 0$として，$-\pi < \theta_x \leq \pi$であり，$\theta_{xy}$は$z_{PA} \geq 0$において$\theta_{xy} < 0$，$z_{PA} < 0$において$\theta_{xy} \geq 0$として，$-\pi/2 < \theta_{xy} \leq \pi/2$である．そして，求めた$\theta_x$, θ_{xy}を用いて，

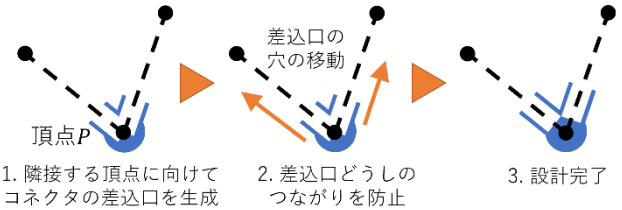
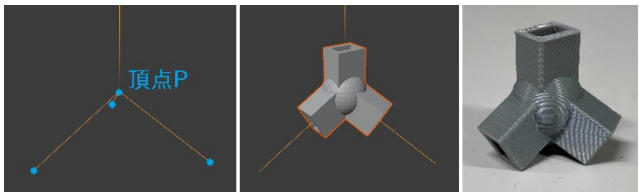


図 5 コネクタ自動設計の流れ



(a) 直線化 (b) 自動設計 (c) 3D プリント

図 6 コネクタの自動設計と出力の様子

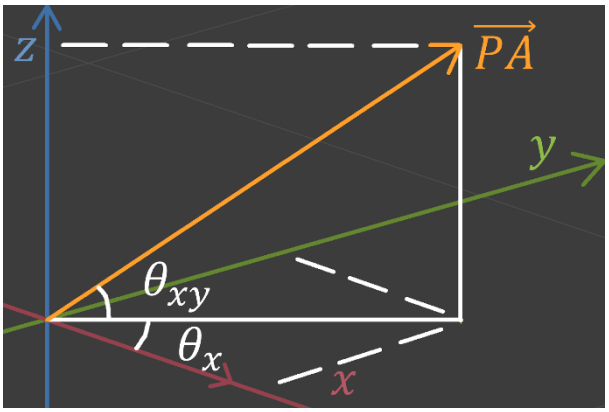


図 7 $\overrightarrow{PA}$に対するθ_xとθ_y

差込口を回転させる．差込口のある頂点を$q = (x_q, y_q, z_q)$，回転後の頂点を$q' = (x_q', y_q', z_q')$とすると，

$$\begin{bmatrix} x_q' \\ y_q' \\ z_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる．この回転を，差込口を構成するすべての頂点に適用する．そして，同様の回転を施した差込口を，頂点 P と結合している他のすべての頂点について生成する．

この時点で，複数の差込口の穴同士が互いに重なり合っている可能性については考慮されておらず，このままでは実際に 3D プリントしたときに，穴同士がつながってしまうおそれがある．したがって，ある 2 つの差込口の穴を構成するすべての面が，それぞれ互いに重なっていないかを判別し，重なっている場合は，互いの穴を，それぞれが向いている方向に少しずつ遠ざける．この作業を，互いの面が重ならなくなるまで繰り返すことで，穴のつながりを解消する．このとき，ある 2 つの差込口の穴が重なっている場合に，この 2 つの差込口のみを互いに遠ざけるのではなく，すべての差込口を互いに遠ざけることで，差込口の長さが不揃いになることを防ぐこともできる．

そして，すべての差込口の頂点を頂点 P の位置まで移動させる．ある差込口のある頂点を$r = (x_r, y_r, z_r)$，移動後の頂点を$r' = (x_r', y_r', z_r')$，頂点 P の座標を(x_P, y_P, z_P)とすると，

$$\begin{bmatrix} x_r' \\ y_r' \\ z_r' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる．最後に，差込口の底面の外接円を回転させてできた球を間質球とし，間質球の中心を頂点 P に位置させ，すべての差込口と結合させることでコネクタの設計を完了する．このとき，差込口の穴が間質球の内部に及んでいる場合は，穴を優先させる．

以上の手順でコネクタを 3D プリンタで出力することができ，複雑な構造のスケルトンであっても，実空間で構築することが容易になる．

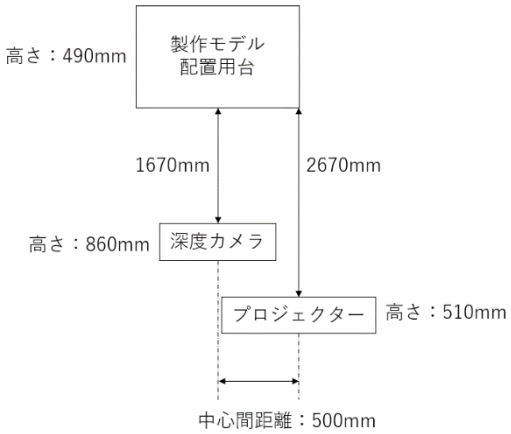


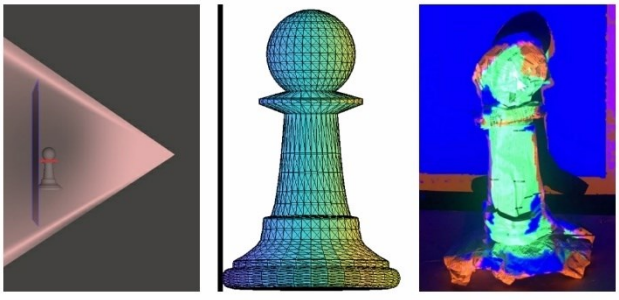
図 8 造形支援中の作業環境

3.5 深度マップを用いた造形支援

深度マップを用いた新聞紙造形の制作支援システムを提案する．作業環境を図 8 に示す．本研究では，制作モデルの造形状態を深度カメラでキャプチャし，計算したガイダンスを制作モデルに直接投影する．入力モデルの深度情報，作業環境から制作モデルを除いた環境深度情報，そしてフレーム毎に深度カメラによってキャプチャされる制作モデルの現在の深度情報をガイダンスに用いる．

深度ガイダンスを行うためのワークフローについて説明する．深度ガイダンスを行うまでの作業過程を図 9 に示す．まず，深度カメラによる深度情報とプロジェクションによる投影情報の位置関係によるずれを修正するためにキャリブレーションを行う．また，入力モデルの深度情報を取得するために，コンピュータ内に仮想の作業空間を作成する．入力モデルは，仮想の作業空間において、実作業空間の制作モデルが配置される位置に配置する．入力モデルの深度情報は，仮想の作業空間内の深度カメラから入力モデルへ向けて，実作業空間の深度マップの解像度に対応したレイを飛ばすことで計算される．本研究では，Ray-triangle Intersection 手法[6]を用いて計算し，解像度は深度カメラと一致する 512×424 であった．その後，ユーザがスケルトンへの造形を始めることで，フレーム毎の制作モデルの深度情報を取得できる．ガイダンスに用いる深度情報D_{Guide}は，以下のように計算される．

$$D_{Guide} = D_{Input} - (D_{Frame} - D_{Env}) \quad (6)$$



(a) 仮想空間　(b) 深度マップ　(c) ガイダンス

図 9 深度ガイダンスまでの作業過程

ここで，D_{Input}は入力モデルの深度情報，D_{Frame}はフレーム毎の深度情報，D_{Env}は作業環境の深度情報である．深度情報D_{Guide}は，入力モデルの深度情報D_{Input}とフレーム毎の深度情報D_{Frame}の差によって求められるが，フレーム毎の深度情報D_{Frame}から作業環境の深度情報D_{Env}を引くことで，作業環境によって異なる背景の深度情報を排除し，制作モデルの深度情報のみの深度情報を得ることができる．また，ガイダンスは，離散的な 3 色の赤・緑・青を用いることによって造形の程度を明確に提示することができる．ガイダンスの色について，投影された箇所が緑ならば適性の厚さ，赤ならば適正の厚さを超過している，青ならば適性の厚さに達していないと表現される．

4. ユーザスタディ

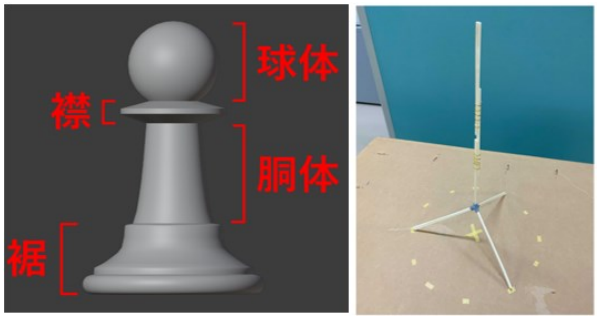
目標モデルとの深度差を投影することによる造形支援の有用性を調べるため，被験者に新聞紙による造形物を制作させる実験を行った．被験者に制作させる目標モデルとしては，図 10(a)に示すような高さ 60cm のチェスのポーンを採用した．ガイダンスの評価にあたって，スケルトンの形状が結果に与える影響を抑えつつ，モデルの輪郭再現の正確性を確認できることが重要である．チェスのポーンはスケルトンが単純でありながら，表面形状は複雑であり，実験結果へのスケルトンによる影響は少ないと考えらえる．

実験では 2 つの被験者グループを設け，各グループに設定した条件下で新聞紙アートを制作させた．グループ 1 では，被験者は，目標モデルを 3D ビューアで確認できるが，造形支援は受けられない．グループ 2 では，被験者は目標モデルを 3D ビューアで確認でき，なおかつ造形支援を受けられる．グループ 1 には，20 代男性 1 名，20 代女性 1 名の計 2 名が参加し，グループ 2 には，20 代男性 3 名，20 代女性 1 名の計 4 名が参加した．

被験者には，完成した状態で配置されているスケルトン(図 10(b))を芯として，目標モデルの新聞紙アートを制作させた．このとき被験者は，新聞紙・はさみ・セロハンテープを自由に利用できた．

一人で新聞紙アートを制作するとき，成形した新聞紙を貼り付ける場所を決定した後に一度その新聞紙を置き，セロハンテープを切り取ってから，先程決めた場所にもう一度新聞紙を配置して貼り付けるという作業が繰り返される．そして，その繰り返しが被験者にとって大きな負担となることが予想された．したがって，セロハンテープの切り取りと，被験者に指定された箇所への貼り付け，はさみの使用に関しては，実験スタッフが補助員としてつき，被験者は自由にその協力を得られることとした．なお，その際，補助員は作品の制作について，一切の助言・評価を行わないものとした．

本実験では，作品の制作に要した時間と，使用した新聞紙の枚数を記録した．また，造形支援有りのグループ 2 の被験者にはアンケートを実施した．アンケートは，被験者がモデルを思い通りに作成できたかと，ガイダンスの参考度・見やすさ・分かりやすさを 5 段階で評価してもらい，最後に自由記述欄を設けた．このアンケートの評価段階はそれぞれの質問に対して，数値が大きいほど肯定的な評価となっている．



(a) ポーンモデル　(b) スケルトン

図 10 実験に用いたポーンのモデルとスケルトン

表 1 アンケート結果

評価量	1	2	3	4	5
思い通りに作れたか	0	1	0	2	1
ガイダンスの参考度	0	0	1	2	1
ガイダンスの見やすさ	0	0	1	2	1
ガイダンスの分かりやすさ	0	1	0	2	1

表 2 ガイダンスの有無による差異

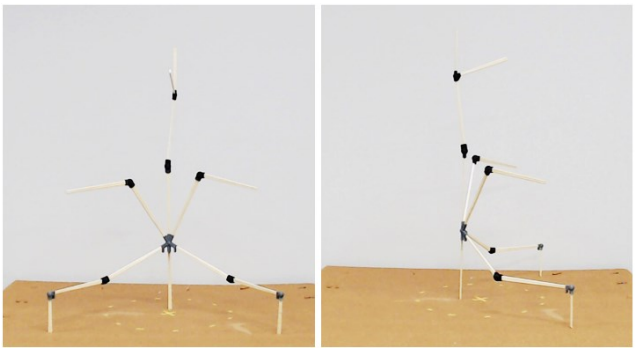
使用枚数	所要時間	ガイダンス
4	0:12:36	無
13	0:16:45	無
13	0:17:47	有
18	0:40:57	有
25	0:53:23	有
28	0:28:03	有

5. 結果

5.1 ユーザスタディ

ユーザスタディで得たアンケート結果と各情報を表 1，2 に示す．全体を通して概ね 4 以上の評価を得ることが出来た．また，ガイダンスが無い場合には，新聞紙の使用枚数が比較的少なく，所要時間も短い傾向にあることが分かった．一方で，ガイダンスが有る場合には，すべての場合において，新聞紙の使用枚数と所要時間がガイダンスの無い場合の最大値以上となった．自由記述欄には，基本的にはモデルを見ながら制作を行い，バランスを見るときにガイダンスを活用した，という意見を得た．

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan



(a) 正面図　(b) 右側面図

図 11 提案手法により作成したスケルトン

5.2 スケルトンの作成

提案手法を用いて作成したスケルトンを図 11 に示す. 指定したモデルのスケルトンを作成できることを確認するために，図 4 に示していたテディベアのスケルトンを作成した．スケルトンを作成するために使用した割り箸の本数は 15 本，コネクタの数は 9 個であった．

6. 考察

6.1 アンケート結果

表 1 のアンケート結果から，各項目において過半数が 4 以上と肯定的な評価を得ることができ，ガイダンスによる一定の効果を示すことができたと考えられる．また，表 2 のガイダンスの有無による差異から，ガイダンス有の場合の方が，ガイダンス無に比べて新聞紙の使用枚数が多く，所要時間が長いことから，入力モデルとの造形度の差を把握することによって，より詳細に制作しようとしたのではないかと考えられる．一方で，使用枚数と所要時間には一定の関係がないことが分かる．

実験中には，新聞紙を複数枚ずつ使用する方法や，造形物の内部を充填せずに空洞にし，モデル表面のみを再現する方法など，被験者によって様々な新聞紙の使い方や制作方法が観察された．また，新聞紙を一度に複数枚使うといった方法や，外郭の内部を確実に充填するか，輪郭のみを再現するかといった，輪郭の造形方法などは個人によって異なっていた．このことから，本研究の深度ガイダンスによって，個人の制作方法が強制されることはないと考えられる．

6.2 制作結果

図 12 に被験者によって制作された作品の 3D スキャンによる比較画像を示す．全体の高さについては，支援有りの作品が目標より平均して 5cm 程度大きい傾向にあった．これは，制作中にスケルトンを何度か動かすことによる投影とのズレが原因であると考えられる．一方，支援無しの作品では目標より平均して 1.5cm 程度小さい傾向があった．これは，スケルトンの頂点が，目標モデルのポーンの球体の中心よりやや上に位置するように設計されており，そこをポーン自体の頂点とした結果，目標よりも小さくなってしまったと考えられる．

ポーンの球体に関して，支援有りの作品では 2 つの作品において目標と大きさが概ね一致しており，残りの 2 つの作品では目標よりやや大きく制作されていた．これに関しても，投影とのズレが原因であると考えらえる．支援無しの作品においては，2 つのうち 1 つは大きさが概ね一致しているが，もう一方の作品は直径が目標の半分ほどであった．支援無しで制作をする場合に，本実験では基準となる大きさがスケルトンしかないためスケール感覚を掴みづらく，再現が難しかったと考えられる．

ポーンの襟部分に関して，支援有り及び支援無しの各作品で特徴が表れる傾向にあった．これは，襟自体が細く詳細度が要求されるパーツのため，積層による造形以外に，被験者独自の造形手法が用いられていたためであると考えられる．

ポーンの胴体部分に関しても，被験者によって特徴が表れていた．目標では，上から下にかけて滑らかに直径が大きくなっており，この再現については支援の有無とは関係が無いように見受けられる．直径の大きさ自体の再現も被験者によって異なっているように見受けられる．

最後に裾部分に関して，支援有りの作品では全ての作品で, 胴体と裾の境目となっている凸部分が再現されていた．一方，支援なしの作品では，この凸部分が再現されることがなかった．また，支援有りの作品には凸部分以下が全く作られないまま完成となったものがあった．これは，実験開始前に仮想の作業空間内と現実の作業空間の位置のズレ

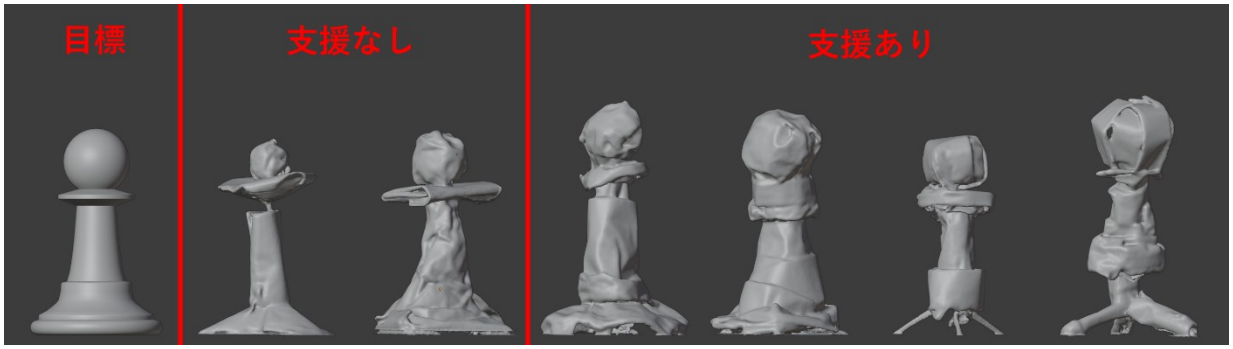


図 12 制作された新聞紙アートの比較

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

によりモデルの下部部分のガイダンスが不十分であるという説明をした影響によるものであると考えられる．

7. 結論と今後の展望

本論文では、スケルトン構造を基盤とした新聞紙造形支援を提案した．スケルトンを用いることで，様々なモデルの作成が可能であり，スケルトンの簡単な作成手法と深度ガイダンスによって，ユーザの新聞紙造形への負荷を減らし，手軽に新聞紙造形を試すことができる．また，本研究では新聞紙と割りばしといった日用品を用いて，実際にモデルが制作できることを示した．

提案手法の課題の１つは，新聞紙による造形後のモデルの重心や，部分毎の荷重を考慮していないことである．これにより，コネクタ及びスケルトンの破損や，サポートスケルトンの破損が考えられる．この問題を考慮することにより，モデルは大きな安定性を得ることができ，複雑なモデルの作成も可能になると考えられる．また，１方向のみのプロジェクションのため，複雑なモデルでは，影ができてしまう点も課題である．これに対し、多方向からのプロジェクションと深度データの取得によって，解決できると考える．

参考文献

[1] A, Jacobson. RodSteward: A Design-to-Assembly System for Fabrication using 3D-Printed Joints and Precision-Cut Rods. (2019). Computer Graphics Forum 38.7 (2019), 765-774 2, 7.
[2] A, Rivers., A, Adams., F, Durand. Sculpting by Numbers. (2012). ACM Trans. Graph. 31, 6.
[3] A, Tagliasacchi., I, Alhashim., M, Olson., and H, Zhang. Mean curvature skeletons. (2012). Computer Graphics Forum (Proc. of Symposium on Geometry Processing) 31, 5, 1735– 1744.
[4] H. Xie, Y. Peng, N. Chen, D. Xie, C.-M. Chang, and K. Miyata. BalloonFab: Digital fabrication of large-scale balloon art. (2019). Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, LBW0164:1–LBW0164:6, 2019.
[5] R, Kovacs., A, Seufert., L, Wall., H, Chen., F, Meinel., W, Müller., S, You., M, Brehm., J, Striebel., Y, Kommana., A, Popiak., T, Bläsius., and P, Baudisch. TrussFab: Fabricating Sturdy Large-Scale Structures on Desktop 3D Printers. (2017). In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’17). ACM, New York, NY, USA, 2606–2616.
[6] T, Moeller., and B, Trumbore. Fast, minimum storage ray triangle intersection. (1997). Journal of Graphics Tools, 2(1):21-28, 1997.

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

(a) 馬：3D モデル　(b) テディベア：3D モデル　(c) ポーン：3D モデル

(d) 馬：正面図　(e) テディベア：正面図　(f) ポーン：正面図

(g) 馬：左側面図　(h) テディベア：左側面図　(i) ポーン：左側面図

(j) 馬：上面図　(k) テディベア：上面図　(l) ポーン：上面図

図 13 スケルトンを用いて作成されたモデル

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan