

修士論文 2019 年度（令和元年度）

3D プリンタを用いたコミュニケーションロボットの

外見変化手法

～Additive-Additive-Manufacturing の実装を通じて～

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

脇本 智正

修士論文 2019 年度（令和元年度）

3D プリンタを用いたコミュニケーションロボットの外見変化手法 ～Additive-Additive-Manufacturing の実装を通じて～

論文要旨

近年、家庭・商業用ロボットの分野において、人工知能やビッグデータによる会話機能・顔認識技術が飛躍的に向上し、ユーザの性格や使用状態に合わせ、知能(会話・モーション等)やソフトウェアをカスタマイズ出来る。しかし、ロボットの外装デザインは選択肢が乏しく、ユーザのオリジナリティーを持たせるハードウェア的な要素は少ない。一方、スマートフォン等様々なガジェットは、ユーザの好みにあわせアプリケーションだけではなく外装等をカスタマイズし使用出来る事が付加価値としての魅力の一つである。これらのようにロボットにも外見的变化を行う事でロボットがより身近な存在やパーソナルなモノへなれると考えた。前述したような変化手法をロボットに行う場合、3D プリンタを用いる。

本研究では、既存品や3D プリント物に対して追加で付加印刷を可能にする技術"Additive-Additive-Manufacturing"を開発し、曲面に従った追加プリンティングや、3D プリント製フェイクヘアーのプリントの手法の応用先の一つとしてコミュニケーションロボット外装に行った。外見的なデザインの多様性や変異性をロボットに持たせる事で、コミュニケーションロボットと人のインタラクションとして、変化がどのように人から見えるのか、またその変化の可能性について、本研究で探求を行う。

キーワード:

1. 3D プリンティング, 2. コミュニケーションロボット, 3. 人工毛,
4. ヒューマンロボットインタラクション

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

脇本智正

Master's Thesis Academic Year 2019

Method of the appearance change for communication robots using 3d printer.

-Through the implementation of Additive-Additive-Manufacturing-

Summary

Recently, In the field of home and commercial robots, conversational functions and face recognition technology using artificial intelligence and big data have been dramatically improved, and intelligence (conversation, motion, etc.) and software can be customized according to the user's personality and usage conditions.

However, there are few choices for the exterior design of the robot, and there are few hardware elements for giving the originality of the user. On the other hand, various gadgets such as smartphones are one of the added value appeals in that not only applications but also exteriors and the like can be customized and used according to the user's preference. It is thought that by changing the appearance of the robot as described above, the robot can become a more familiar existence or a personal thing. When performing the above-described change method on a robot, a 3D Printer is used.

In this research, we developed a technology "Additive-Additive-Manufacturing" that enables additional printing on existing products and 3D Printed materials. One of the applications of the method was to the exterior of a communication robot. In this research, we will explore how change can be seen by humans as an interaction between a communication robot and a human, and the possibility of that change by giving the robot a variety of appearance design and variability.

Key Words:

- 1.3D Printing, 2. Communication Robot, 3. Artificial Hair,
4. Human Robot Interaction

Graduate School of Media and Governance

Tomomasa Wakimoto

目次

目次.....	i
1 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 コミュニケーションロボットの需要拡大とデザイン選択肢の問題.....	1
1.1.2 物語から見るロボットの“外見的差異”と自己成長.....	2
1.1.3 ロボットに対する人間の知覚.....	3
1.1.3.1 アニミズム.....	3
1.1.3.2 アニマシー.....	4
1.2 研究目的.....	4
1.3 本研究で取り扱う領域について.....	4
2 関連研究・事例.....	5
2.1 ロボットカスタマイズの需要と事例.....	5
2.2 ロボットコスチューム・ファッション.....	6
2.3 ロボットの修理サポート終了と新たな“お葬式”という形.....	8
2.4 人工知能やビックデータを用いた知能のパーソナライズ化.....	9
2.5 アニマシー知覚を得る“毛”.....	10
2.5.1 生物模倣の毛.....	10
2.5.2 非生物模倣の毛.....	11
2.5.3 ハイブリット型模倣の毛.....	11
3 3Dプリンタを用いた外的変化の概念構築.....	12
3.1 これまでのコミュニケーションロボットの進化.....	12

3.2	外見的進化を手に入れるコミュニケーションロボット	12
4	3D プリント手法の開発	14
4.1	関連技術・研究	14
4.2	Additive-Additive-Manufacturing	15
4.2.1	3D スキャニング	16
4.2.2	ハードウェア	17
4.2.3	ソフトウェア	20
4.2.4	AAM の手順とサンプルプリント	22
4.3	Additive-Additive-Hair	28
4.3.1	ヘアプリントの関連研究・事例	28
4.3.2	ヘアースライサ開発	29
4.3.3	ヘアプリントサンプル①	32
4.3.4	4 軸プリントシステム開発と自動カット化	33
4.3.5	ヘアプリントサンプル②	36
5	外見的变化の例	39
5.1	AAM による外見変化	39
5.2	AAH による外見変化①	39
5.3	AAH による外見変化②	40
6	評価と考察	41
6.1	展示とコミュニティイベントの参加	41
6.1.1	CHI2018 展示	41
6.1.2	Maker Faire Tokyo2018 展示	42
6.1.3	ロボットコミュニティイベントでのデモ	43

6.2	考察	44
6.2.1	カスタマイズとしての外見の変異	44
6.2.2	模倣としての外見の変異	45
6.2.3	自己成長としての外見の変異	47
6.2.4	ロボットの身体的成長する未来シナリオと取り組み	49
6.3	今後の展望	52
7	まとめ	53
	謝辞	54
	参考文献	55
	図表引用	57
	出典	60

1 序論

1.1 研究背景

人との会話や接客・生活支援を目的とし家庭・商業用のコミュニケーションロボットの製品化・研究開発が盛んであるが、ユーザの好みや使用用途に合わせ、カスタマイズ性を持つ事が可能な製品は知能や動作などソフトウェア的な側面が殆どである。これは複数ユーザとの会話内容や表情を経験値として大量に収集しAIを用いて処理・判断し知能学習とする形で機能強化が可能となり、コミュニケーション能力や表現力が上昇している。筆者は、ロボットにも人類や他の生物と同じように一定の同じ特徴(駆動方式・骨格・大きさ)を持ちながら、己の“個”や“他者と区別する手段”として外見的に変化を持たせる事が重要になると考える。

人工物に対して“成長”を感じる要素は知性だけではなく、生物や植物に対し身体の変化、毛や枝の長さなどの視覚的な要素から感じ取る事が多いと考える。筆者は3Dプリンタがカスタマイゼーション性に優れている点を用いてロボットの外見を変化する事が可能となれば、ユーザ趣向に合わせた外見の実現、所有感覚の向上が見込めると考えた、また前述したロボット自身の経験値や知性から情報を元に外見を変化させる事で自身を成長・変化させる事も可能になると考える。

1.1.1 コミュニケーションロボットの需要拡大とデザイン選択肢の問題

状況の変化や会話内容応じ、動作・言葉・感情等を変化させる事が可能なコミュニケーションロボットは、会話相手、接客対応、生活支援等での活躍が期待され、世界中で研究・開発が盛んな分野であり、近年では、接客業務の自動化による人手不足解消、介護・福祉分野による心的・身体的なケアの目的でも活躍が期待され、図 1.1.1-1 のように市場規模の推移予想がされている。



図 1.1.1-1 2017 年のコミュニケーションロボットの産業規模の予想図

需要増加に伴い、用途や使用目的が多様化・複雑化すれば、ロボットの外見デザインや機能の豊富さが重要となる [1]が、ロボットの外見的デザインは機構や機能の複雑さコスト的な観点からシンプルかつ単純で親しみやすいデザインで製造される事が殆どでありデザインとしての選択肢が少なく、普及の足枷になっていると思われる。

感情的な体験に重点を置くロボットにも注目が集まり、親しみを受けるようなロボットにはデザイン性や愛くるしさの要素が非常に重要となってきた。

1.1.2 物語から見るロボットの“外見的差異”と自己成長

ロボットはサイエンスフィクション(SF)作品で数多く登場する、アニメ”攻殻機動隊 SAC”²で描かれる“タチコマ”は共有学習によって他のロボットが経験する事を同時学習する、基本的な見た目が同じ為、区別する事が難しく、しゃべり方や声のトーン、各々の自我が持つ興味分野等、会話の様子からそれぞれを特定するしか無い。映画 ”I Robot“の一部シーンでは、量産されているロボットの群れの中に1体だけ違うプログラムで動く”サニー“が登場する。大量に並ぶロボットからその1体を見抜くことは非常に難しく、主人公がどのロボットが”サニー“なのかを見抜くシーンはとても印象的である。これら2つの作品からは、量産されたロボットがいかに知的な”個“を持っていたとしても、人間が見ただけで区別する事は難しく、ロボットという大量生産品は、人間が持つ外見的な”個性“というものをなくした、奴隷的な存在であるように描写されがちであると筆者は感じる。

一方、映画”オートマタ”は、ロボットに対し、自他ともにロボットの修正（改造）

を行う事が禁止されている世界が描かれている。ロボットがこのルールを破り、勝手に改造している事を突き止める為に主人公は真相を探していくが、ロボットの“自我”や知能発達によって、ロボット自身を外見的に改造する事で、新たな生命・ロボットとしての“種”を生み出し、人類が核で汚染された世界では生きれぬ為、人類からロボットへと種族交代をする時であると描かれている。

筆者は、このような SF 作品や物語から、人類が生み出した、人工的な生命体がいずれ、“自我”や“個性”を持った時、恐怖や脅威を生み出す(士郎正宗 攻殻機動隊、押井守 Ghost in the Shell, ターミネータシリーズ等)と語られる事が多かったが、映画“オートマタ”のような観点で見た時に、人工物にも自己を外見的に成長させる事が出来なければ、人類が歩んできたような進化の過程が物理的に発生せず、現実世界での新たな“種”として宣言する事は難しいと筆者は考える。

1.1.3 ロボットに対する人間の知覚

本論文では、コミュニケーションロボット等の研究において、最も多く取り上げられるロボットに対する現象“不気味の谷” [2]ではなく、アニミズムやアニマシー的な知覚を用いて研究の評価や観察を行う。また、本論文で扱う“コミュニケーションロボット”の定義は、音声や表情に感情表現に限らず、動きやいくつかのインタラクションを持つロボットを総じてコミュニケーションロボットという。

1.1.3.1 アニミズム

アニミズムとは、生物や無機物を問わず、この世に存在するモノに靈魂もしくは魂などが宿っているという考え方である。ロボットのようなテクノロジーによって生みだされたモノに感じる場合、テクノアニミズムともいうが、本研究では、これを総じてアニミズムと呼ぶ。

日本人は、神道などの宗教的な観点から、多神教的な考え方を多く持ち、西洋の一神教的な考え方とは違い、アニミズム意識が強いとされている。 [3]

日本人がアニミズム的視点を持っている事はロボットの物語創作や研究において、恐怖や警戒心よりも先に、魂が機械に宿る事を肯定的に捉える傾向が強いとされる。³

1.1.3.2 アニマシー

アニマシーは、生物性・有生性と訳されるが、動物に対して感じるアニマシーとロボットに対して感じる事は異なる。対象が生物かどうかは見た目では判断出来ない、しかし“生き物である”という感覚（アニマシー）は動作や光の強さなどの些細な動作でも生物のように見えるという実験がある。[4]⁴

また、動き以外にも、外見の変化をもたらすだけでアニマシーの知覚に変化が起きる [5] このような、動きや、見た目が生物に似ている事から生命感や可愛さ、癒しさを感じる事を本論文ではアニマシー知覚と呼ぶ。

1.2 研究目的

本研究では3Dプリンタを用いてロボットの為の外見変化を可能にするプリント技術の検討・開発を行い、表現方法としてその技術を用いたプリント品やロボットの外装に施した状態を評価し、ロボットの外装表現の新たな手法の一つとして提案し、ロボット分野のデザイン研究および3Dプリンティング技術の発展に寄与する事を目的とする。

1.3 本研究で取り扱う領域について

ロボット分野の研究開発は非常に他項目にわたるが、本論文では外見や外装デザインといった、デザイン学に沿った研究を行う。3Dプリンタにおいては、スライシングソフトやファームウェア開発といった、ソフトウェアを中心に扱う。

2 関連研究・事例

本章では、研究に関する研究・事例について述べる。ロボットは多角的な視点で扱われ、科学技術分野における代表的な研究分野であり、ヒューマノイドやアンドロイドが、根本としてはエンターテインメントとしてサイエンスフィクションの小説やアニメ・映画においても描かれ、研究や事例に多くの影響を与えてきた。

アニミズム(人間以外のあらゆるモノに魂や例の存在を認める考え方)や、アニメシー(生物以外のモノに“生き物らしさ”を感じる事)知覚を得る事例が多く存在する。

2.1 ロボットカスタマイズの需要と事例

愛玩用のペット型ロボットや、二足歩行ロボットの小型化によるホビーロボットの登場以降、愛好家たちの間ではロボットのカスタマイズという文化が発生した。



図 2.1-1 AIBO のカスタマイズ例 ⁵

図 2.1-1 のように市販品に存在しないカラー塗装やステッカー・部品の取り付け等を行うユーザが 2000 年頃から登場する。また 3D プリンタの一般化によってプラスチックのカスタマイズ・オリジナル部品の製作が 2015 年頃から登場し始め 3D モデルのシェアサイト”Thingiverse” ⁶ 等を中心にシェアされている。図 2.1-2

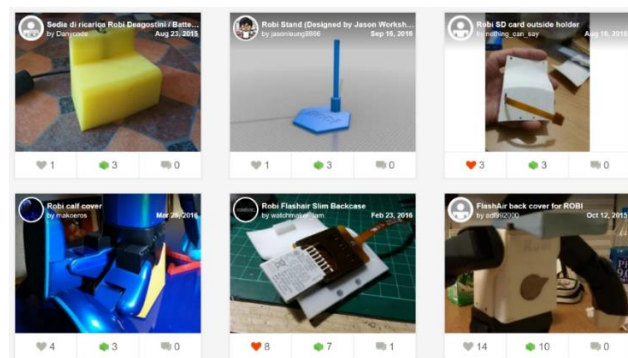


図 2.1-2 3D モデルシェアサイトでの検索結果

2.2 ロボットコスチューム・ファッション

SONY 社の販売したペットロボット(エンターテインメントロボット)シリーズ AIBO [6]は新しいペットの形として愛好され、2.1 章で紹介したカスタマイズ以外の楽しみとして動物のペットと同様に衣類を着せるというムーブメントも起こった。



図 2.2-1 AIBO ファッション例 1 2001 年頃 ⁷

AIBOをはじめとし人型ロボット等のコミュニケーションロボットの販売に伴い、それぞれのロボットに合わせた衣類や型紙の販売・交換・情報共有がSNSやフリーマーケット・オークションサイトを中心に行われ、新たなビジネスマーケットとして注目され始めた。

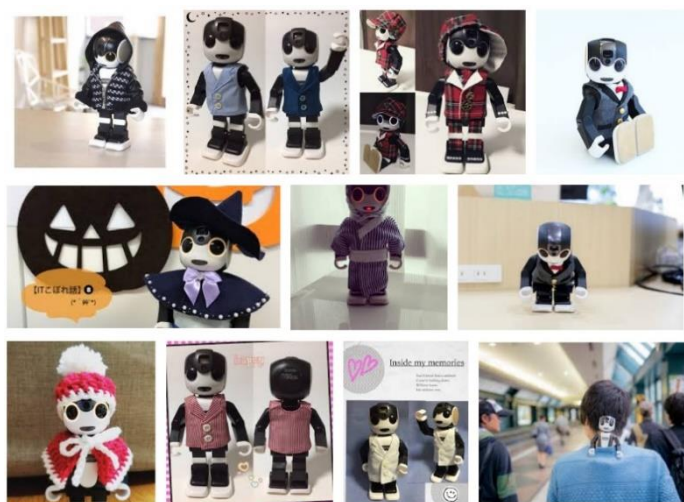


図 2.2-2 Robohon 服⁸⁾

近年では、SoftBank 社の pepper に代表される商用コミュニケーションロボットも企業イメージやユニフォームを模した衣類をコスチュームとして着用させる事例やビジネスも発生している。

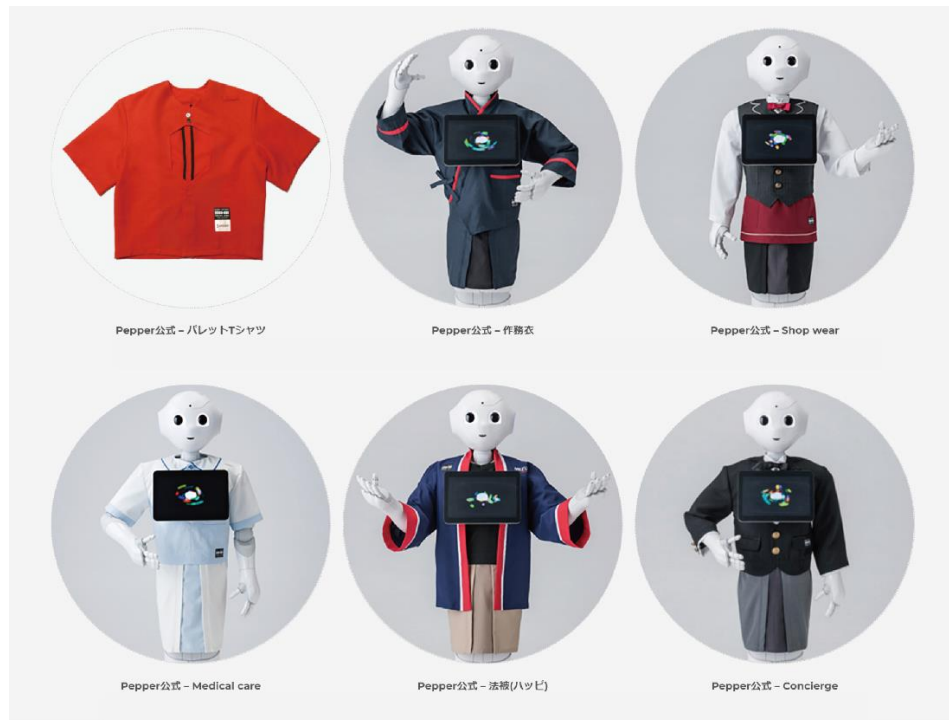


図 2.2-3 Paper 商用向けファッション⁹

上記から、コミュニケーションロボットの外装に服を着せる事例は年々増加傾向にあり、ホビーユースから商用品まで登場している。

2.3 ロボットの修理サポート終了と新たな“お葬式”という形

コミュニケーションロボットに対する愛着や愛好心からロボットの故障や修理に対する新たな問題も発生している。2014年3月、AIBOを販売するSONYは修理サポート「AIBO クリニック」の閉鎖を発表した、コミュニケーションロボットにおける修理やサポートは重要視され継続されていたが、部品供給の難化から修理を受けられなくなった。“ロボット型ペットは命が永遠である”と考えるユーザも多く、サポートの継続が望まれる中、非公式での修理やサポートが開始された。¹⁰ 元開発者やエンジニアが中心となり、非公式ではあるが修理という形が現在も継続されている。部品供給を受けるため、所有するユーザから”お葬式“という形でロボットを手放して貰い、“献体“されたロボットから部品や重要部品の供給を行っている。“ロボットのお葬式“は新たな製品の終了の形として注目されロボットと人の関わり方として新たな価値を見出した。



図 2.3-1 AIBO のお葬式の様子 ¹¹

2.4 人工知能やビックデータを用いた知能のパーソナライズ化

コミュニケーションロボット分野でも近年、人との会話内容やカメラを用いた視覚情報等をビックデータとして収集しディープラーニングや AI を知能の要素技術として用いている製品が増加している。これはロボットを実世界で活用する為に WEB や他の IT 分野で利用が進む通信技術・大量データ処理によって問題解決や対応が可能になるとされているからだ。また、パーソナル利用が進みロボットの“個性”や“性格”として定義し、知能や行動的に成長や進化を感じさせる取り組みも進んでいる。

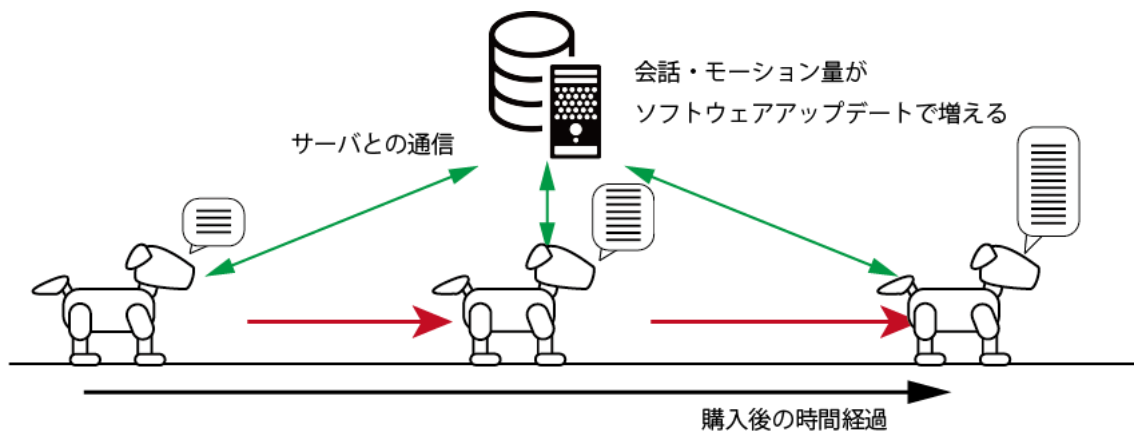


図 2.4-1 知的成長するペットロボット

しかし、サーバやシステムとの通信によって知的処理を外部化している為、サーバの運営終了や通信障害によってロボットの知的活動が出来なくなるという問題も発生している。¹²

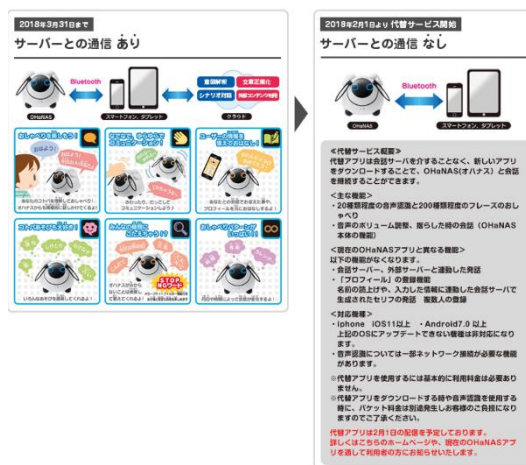


図 2.4-2 サーバサービス終了による知能低下問題^[12]

2.5 アニマシー知覚を得る“毛”

“毛”は生物学上、保温性・耐摩耗性・抗日射性といった様々な機能的要素として生物に存在し、進化の過程で量や生える箇所が変化してきたとされる。しかし、人類は機能的な役割のみならず、古来より伝統芸能のお面や祭具、美的観点や表現手法の1つとして“毛”を用いている。ロボットや人工物に対して毛を生やしている事例を以下に述べる。

2.5.1 生物模倣の毛

生物を模倣したアンドロイドやアニマロイドではモデルとなった元の生物に近づける為、体毛・髪の毛を取り付ける事が多く、石黒の開発するジェミノイド [7](図 2.5.1-1) やパロ [8](図 2.5.1-2)が代表的である。



図 2.5.1-1 ジェミノイド[5]



図 2.5.1-2 パロ [6]

ジェミノイドは皮膚や表情等人間を模倣する要素も多く不気味さを感じるが、頭髮に着目すると、髪型や髪質を人間に近づける事で、一見人間のように見える。パロはアニマロイドの中でもアニマルセラピーの効果が高く、観察者は癒しや落ち着きを得る事ができる。

2.5.2 非生物模倣の毛

人工物に対し毛が生える・付いているものが存在し、源氏物語等に登場する色糸で飾った牛車“糸毛車”¹³(図 2.5.2-1)”や、イタリアのヘアスタイリスト、マリア・ルチア・マグノ氏が制作した自動車に人毛を生やした作品¹⁴(図 2.5.2-2)がある。



図 2.5.2-1 糸毛の車^[13]



図 2.5.2-2 HAIRIEST CAR^[14]

2.5.3 ハイブリット型模倣の毛

前述した、2種類を組み合わせていると解釈できる模倣の仕方をここではハイブリット型模倣と呼ぶ。クッション型のセラピーロボット”Qoobo”¹⁵ や アニメ機動戦士ガンダム 00 で登場する”ガンダム・ナドレ”¹⁶のように毛がなければ、クッション・人型戦闘ロボットという認識になるが、しっぽや髪の毛のように見える毛が人工物に付くだけで、猫や頭髮の生えたロボットのように認識できるかもしれない。



図 2.5.3-1 Qoobo^[15]



図 2.5.3-2 ガンダムナドレ^[16]

3 3Dプリンタを用いた外的変化の概念構築

3.1 これまでのコミュニケーションロボットの進化

2章の事例より、コミュニケーションロボットに対しソフトウェア・ハードウェアの側面で、アニミズムとアニマシーの2種類に分類できると推測する。2.3、2.4項の知能成長による“知”の認識やロボットに対する“成長・老い・死”という感情はアニミズム的でありソフトウェアの変異と、ロボットの経年劣化や機械的寿命というハードウェアの老化によって起こる。2.1、2.2、2.5項のアニマシー(生き物らしさ)的な感覚は、モーションや顔面の表情変化と、人間の一方的なコントロール欲求や模倣させようとする想像力から生み出されている。(図 3.1-1)

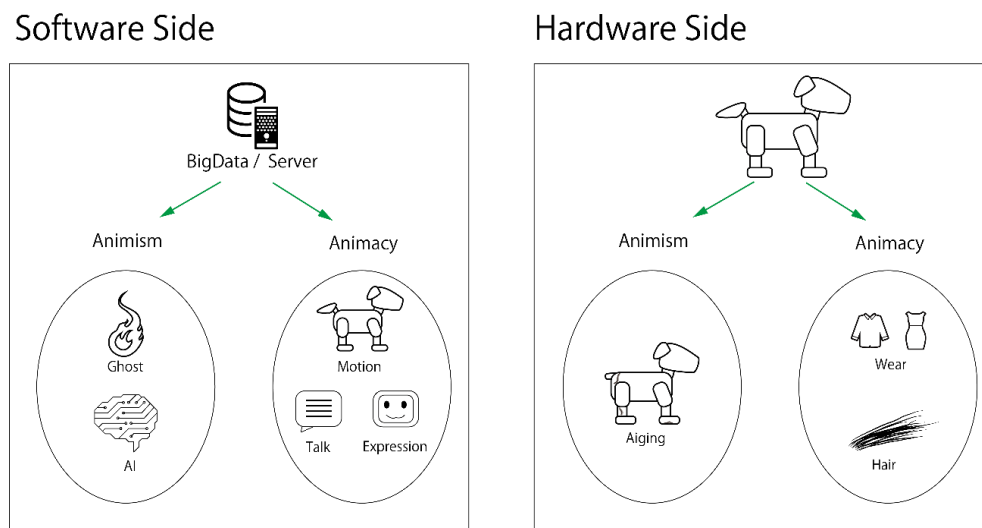


図 3.1-1 コミュニケーションロボット現在の形

3.2 外見的進化を手に入れるコミュニケーションロボット

物語の中で絵描かれてきた、知能的な成長や人工知能による自我の認識が具現化され始めた昨今、SF 映画オートマタで描かれているロボットのように、ロボット自身・同士がお互いを修理・改造し、物理的・外見的な成長や変化が可能となるかもしれない。

また、子犬の可愛さが生存戦略の1つである可能性が高いとされる [9]と同様にコミュニケーションロボットの生存競争の形として見た目を変異する事で、不気味さや脅威

と感じさせないような取り組みが始まると筆者は推測する。

ロボットの外見的变化は人の作業のよって衣類や塗装等が実施されてきたが、3D プリンタを用いる事で、マスカスタマイズ的な製作やロボットが蓄積したデータからロボットの外見モデルを生成する事からプリントが可能になるだろう。

Software & Hardware Growth

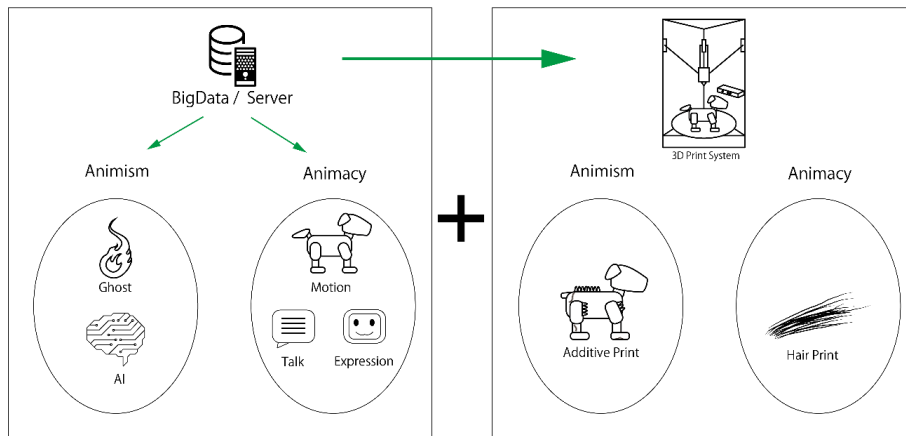


図 3.2-1 ソフトウェア面とハードウェア面を組み合わせた新しい形

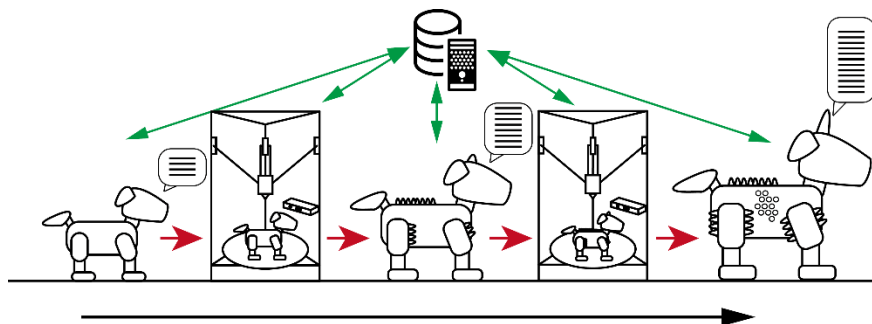


図 3.2-2 知的・外見的成長が可能なロボットの構想図

ロボットの認知研究として“発達ロボティクス”という分野が存在するが、知能としての発達はその殆どであり、3D プリンタ等を用いてロボットを外見的に“発達”や“変異”させる研究はこれまでに見当たっていない。本研究では、図 3.2-2 の中で、物理的変異を実現させる 3D プリンタの技術開発を中心に行い、ロボットの外見的变化の実験と評価を行う。

4 3D プリント手法の開発

本章は前章までに述べた3Dプリンタでロボットの外装部品を変化させる方法を検討し、技術解説とその実装手順やテストプリントを述べる。

4.1 関連技術・研究

3Dプリントは出力中の電源喪失や不慮の操作等で出力停止した場合、作業を再開する事が可能な装置があるが、高度なシステムを搭載しないプリンタ等でも可能とする為に3Dプリンタに切削装置を含み複合加工する技術 [10]や、造形物を回転テーブルに取り付け、多面的なプリントを可能にする技術 [11], 3Dプリンタに非接触型の3Dスキャナを取り付け斜面の形状を取得し本来のモデルデータから差分プリントを行うシステム [12]が研究されている。

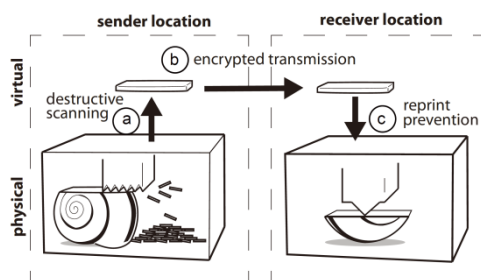


図 4.1-1 Additive & Subtractive Machine

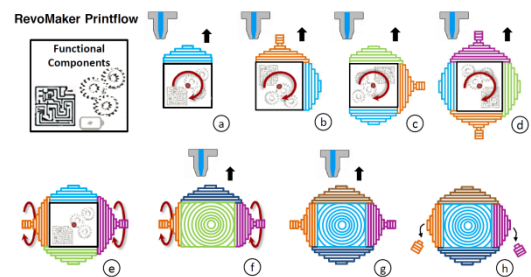


図 4.1-2 回転型複数面プリント

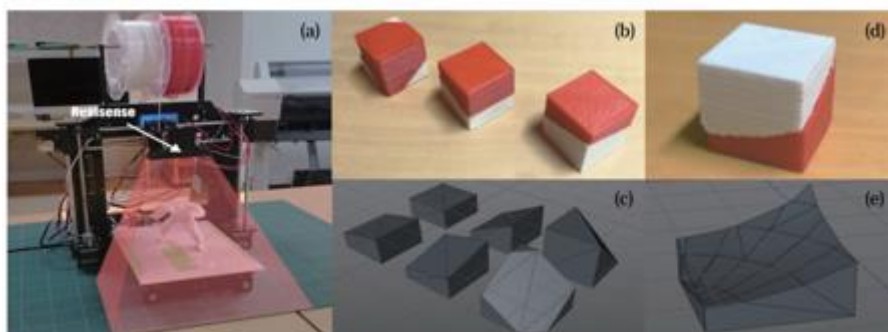


図 4.1-3 スキャナを用いた追加印刷技術

4.2 Additive-Additive-Manufacturing

4.1 章で述べた関連研究を元に新たなプリント工法を開発する。3D プリント品や既成品に対し、再度積層造形する事から追付加(Additive)製造するという意味を含め”Additive- Additive-Manufacturing”(以下 AAM)と名付け、概略図を次に示す。

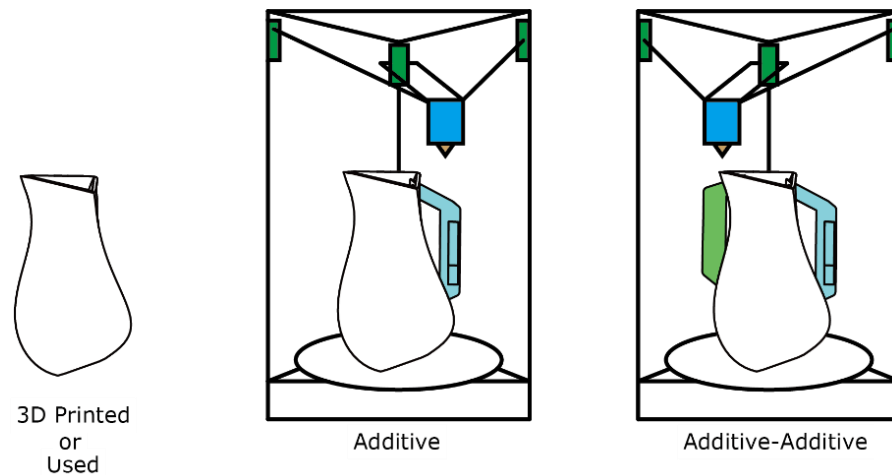


図 4.2-1 Additive-Additive-Manufacturing の概要

追加プリントのベースとなるオブジェクトは複雑な曲面が多く、その曲面に従った動作を可能にする為には曲面動作するスライサの開発が必要となる。一般的な3D プリンタで用いる平面スライサと開発する曲面スライサの差異を次に示す。ベースモデルの表面データを高精度に取得するには、3D スキャンもしくは CAD で製作された 3D モデルを用いる。

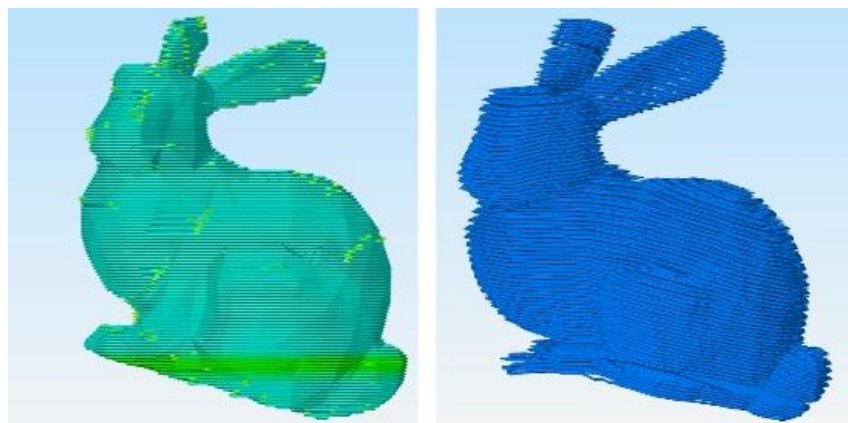


図 4.2-2 平面スライサ(左) 曲面スライサ (右) の違い

4.2.1 3D スキャニング

3D プリント物や既製品の 3D データを取得するため、用途や条件に合わせ 3D スキャナを使い分ける。本項では研究で用いるスキャナの種類と利点を記す。

・CT スキャナ

放射線を物体に照射し断層画像を連続的に回転させながら撮影する事で高精度な内部構造を含むモデルで取得する事ができ、ロボットパーツのような小型部品の複製や内部構造の解析等リバースエンジニアリングに適すが、取得データが膨大であるためデータの軽量化や編集が必須となる。



図 4.2.1-1 産業用小型 CT スキャナ¹⁷

・非接触式 3D スキャナ

非接触方式は対象物の凹凸状態を取得し複数の 3 次元座標を元に 3 各面の集合体“ポリゴンデータ”に変換し立体物としてデジタル化する方法である。

レーザー光タイプと、パターン光タイプの 2 つに大別され(図 4.2.1-2)¹⁸、中～大型にモノをスキャンする場合は図 4.2.1-3¹⁹ のようなハンディ型を用いる。

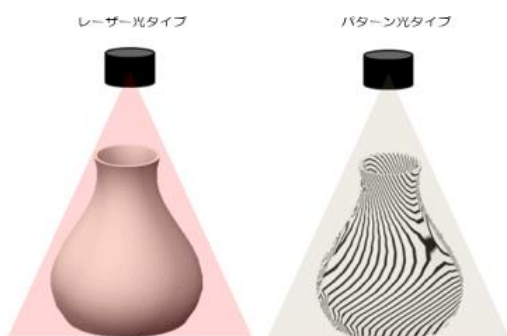


図 4.2.1-2 3D スキャンシステム^[18]



図 4.2.1-3 ハンディ型スキャナ^[19]

4.2.2 ハードウェア

AAM を実施する 3D プリンタの駆動方式を選定する。3D プリンタには大きく分けて 7 種類存在し(図 4.2.2-1)、再造形技術など 4.1 での先行研究や事例から FDM 方式が適している。ロボットアームを用いたプリント事例はプリント角度の制約等が改善され複雑なプリントが可能となるが、装置が大型化する点、マシンコストの観点から、本論文では入手が容易なデスクトップ型 FDM 方式のプリンタを用いる。

7 Families of Additive Manufacturing

According to ISO/ASTM/ISO/2000-15 formerly ASTM F2792

VAT PHOTOLITHOGRAPHIZATION	POWDER BED FUSION (PBF)	BINDER JETTING	MATERIAL JETTING	SHEET LAMINATION	MATERIAL EXTRUSION	DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)	HYBRID
Alternative Names: SLA - Stereolithography Apparatus DLP - Digital Light Processing CLIP - Continuous Liquid Interface Projection - Selective Laser Clipping - Selective Laser Clipping CLIP - Multi Jet Fusion Description: A vat of liquid photoinitiator resin is cured by a laser beam, exposing a light field to form a cross section of the part. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - High level of accuracy and complexity - Smooth surface finish - Accommodates large build sizes Typical Materials: UV Curable Photoinitiators Resins	Alternative Names: SLS - Selective Laser Sintering, DMLS - Direct Metal Laser Sintering, DED - Direct Energy Deposition, SLM - Selective Laser Melting, DED - Direct Laser Deposition, DED - Selective Laser Clipping, DED - Multi Jet Fusion Description: Powdered material is selectively consolidated by the laser beam of a laser source. The laser beam is scanned across the powder bed in a layer at a time. The powder is fused to form a solid part. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - High level of complexity - Flexible with a support material - Wide range of materials Typical Materials: Plastics, Metal and Ceramic Powders, and Sand	Alternative Names: 3D Printing DLP - Direct Laser Printing SLM - Selective Laser Melting SLM - Multi Jet Fusion Description: Liquid binding agents are selectively applied to the powder bed of a laser source. The laser beam is scanned across the powder bed in a layer at a time. The powder is fused to form a solid part. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - Allowed for full color printing - High productivity - Wide range of materials Typical Materials: Powdered Plastic, Metal, Ceramic, Glass, and Sand	Alternative Names: Printing DLP - Direct Laser Printing SLM - Selective Laser Melting SLM - Multi Jet Fusion Description: Droplets of material are deposited layer by layer onto a substrate. The material is cured by a laser beam. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - High level of accuracy - Allowed for full color printing - Enables multiple materials in a single part Typical Materials: Photopolymers, Polyurethanes, Wax	Alternative Names: LDM - Laminated Sheet Manufacturing LDM - Laminated Sheet Manufacturing LDM - Laminated Sheet Manufacturing Description: Sheets of material are stacked and laminated together. The material is cured by a laser beam. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - High mechanical build rates - Material loss from post-manufacture - Allows for combinations of materials - Enables multiple materials in a single part Typical Materials: Plastic, Plastic Sheets, and Metal Foils/Tapes	Alternative Names: FFF - Fused Filament Fabrication FFF - Fused Filament Fabrication FFF - Fused Filament Fabrication Description: Material is extruded through a nozzle or orifice. The material is cured by a laser beam. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - Very limited by density or size - Thermal and mechanical anisotropy - Multiple materials in a single part - Enables multiple materials in a single part Typical Materials: Thermoplastic Filaments and Polymers (FFF), Metals, and Ceramic Filaments	Alternative Names: LDM - Laser Wire Deposition LDM - Laser Wire Deposition LDM - Laser Wire Deposition Description: Powder or wire is fed into a melt pool which is generated on the surface of the part. The material is cured by a laser beam. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - High level of accuracy and complexity - Smooth surface finish - Accommodates large build sizes Typical Materials: Metal Powder and Wire, and Ceramics	Alternative Names: AMB - Created by Hybrid Manufacturing Techniques Description: Lower resolution (in form of DED) is combined with DED resolution. The process is repeated until the required solid part and contours are exposed across a solid part. Strengths: - Smooth surface finish - Accommodates large build sizes - Enables multiple materials in a single part - Enables multiple materials in a single part Typical Materials: Metal Powder and Wire, and Ceramics

図 4.2.2-1 3D プリンタの造形種類 20

デスクトップ型 FDM 3D プリンタは様々な駆動種類が存在し、図 4.2.2-2 のように分けられる。

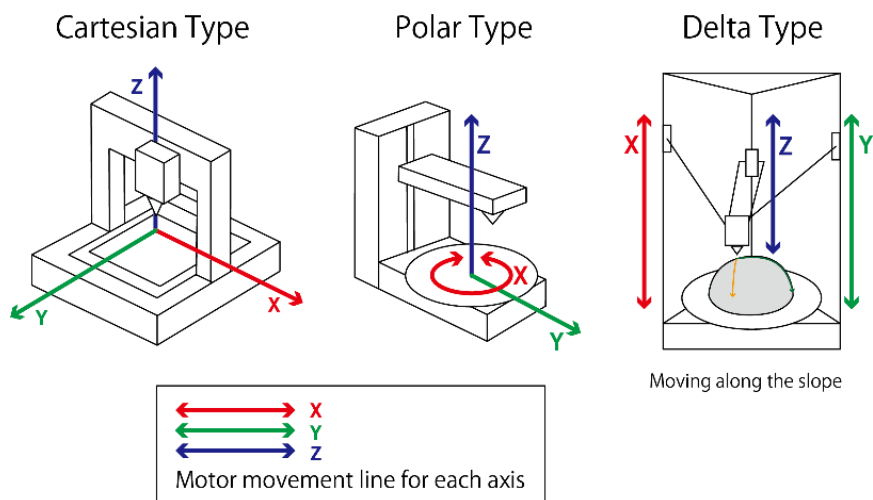


図 4.2.2-2 FDM 方式プリンタ駆動方式の違い

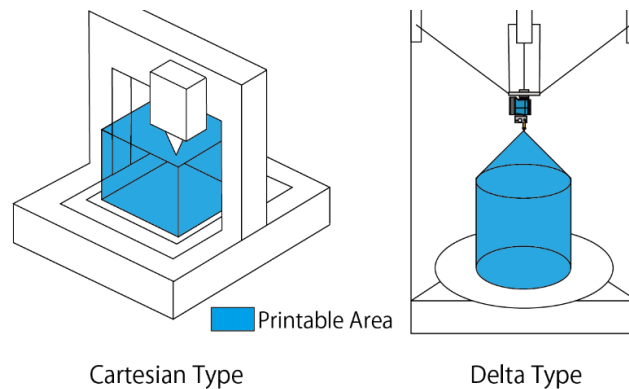


図 4.2.2-3 方式違いによる造形エリアの差異

カルテシアン型や、ポータ型は押出部(エクストルーダ)付近に駆動機構が存在するモノが多く、プリント時の駆動範囲が小さくなりがちである。一方、デルタ型プリンタは平行機構を用い、各動作軸が図 4.2.2-2 のように上下移動し、各アームの上下位置関係によって押出部を3次元的に移動させる。特徴として球状・円筒上に動作範囲の確保が可能であり、押出部周辺を小型・軽量化する事が容易である。デルタのプリントエリアは円錐型である。(図 4.2.2-3) 以上点を踏まえ、デスクトップ型 AAM ではデルタ型プリンタを元に開発を行う。

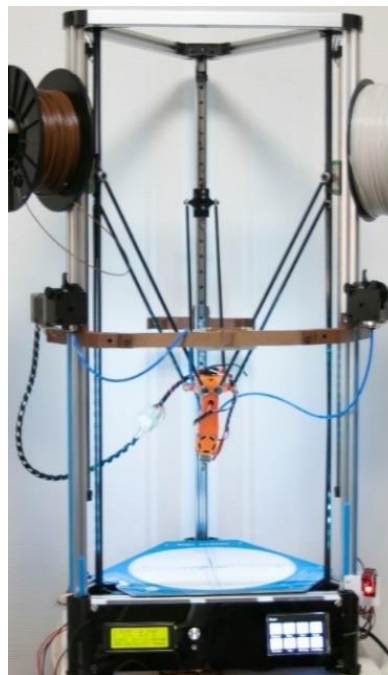


図 4.2.2-4 本研究で用いるデルタ型 3D プリンタ

FDM 方式の 3D プリンタは、オープンソースでの開発・販売が非常に盛んであり、特に材料を加熱出力する為のノズル・ヒートブロック部には多くの種類が存在している、AAM でもっとも重要となるのはノズルの先端で、ノズル先端と、加熱部(ホットエンド)の点を結んだ線と母材となるオブジェクトとの角度 α , α' の大きさによってプリント可能な角度が定まる。(図 4.2.2-5) 角度適した部品の選定例を記す。

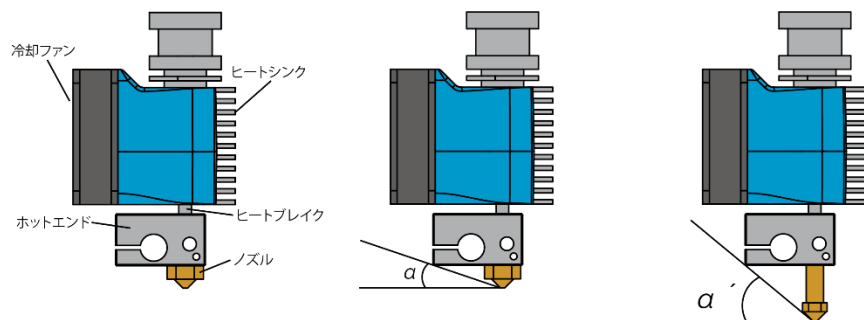


図 4.2.2-5 部品名称、及びプリント角度の違い

一般的なノズル・ブロックの組み合わせは傾斜 20 度程だが、部品の組み合わせ方によって、最大角度は 60 度程度まで可能となる。

4.2.3 ソフトウェア

3D プリンタを駆動させるデータ(G-Code 等)を生成するには一般的にスライシングソフトウェアと呼ばれるソフトを用い、3D モデリングソフトで製作したデータを一定の形式(STL,OBJ,PLY 等)で出力し、スライシングソフト内で3D データ切り分け内部構造や印刷設定に基づいた移動データと押出量を算出している。一般的なスライシングとしては図 4.2.3-1 の左図のような工程となるが、本研究ではモデリングソフト内にスライサ機能を実装する事で、直接的にプリントファイルとして出力する事が可能となる。



図 4.2.3-1 スライサの違い

スクリプトについて

本論文では AAM のスクリプト開発・実行に”Rhinceros”²¹を用いる。Rhinceros にはプログラミング言語 Python を用いてスクリプトやモデリングコーディングによって実行できる Rhino-Python という開発ツールがあり、これを用いてコーディングを行った。

Rhinceros では座標点を取得する事が可能であり、これらの座標を 3D プリンタの移動座標点として用いる

3D プリンタはオープンソースで開発され、制御コマンドは RepRap_wiki(URL 参照)を参照する。

RepRap Wiki : <https://reprap.org/wiki/G-code>

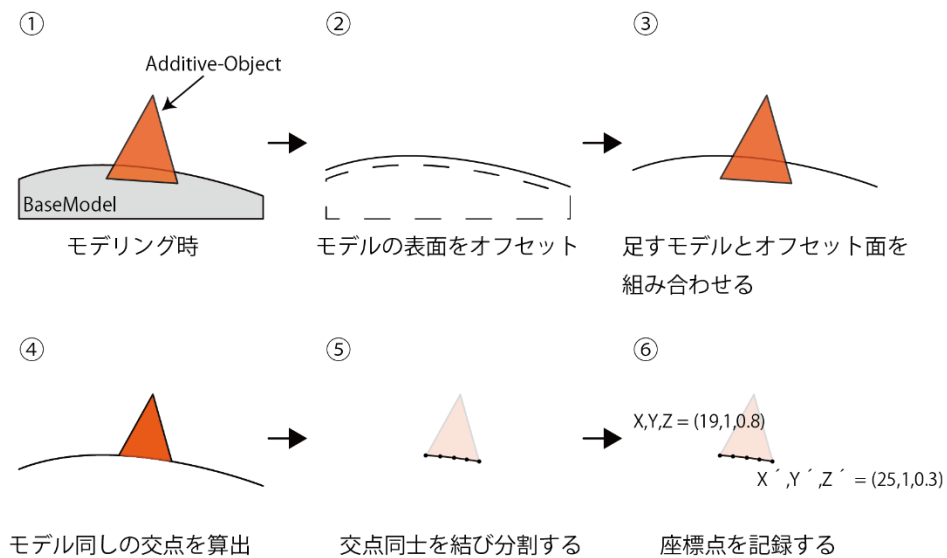


図 4.2.3-2 AAM スクリプトの概要図

図 4.2.3-2 のようにベースモデルの表面メッシュを Z 軸方向にオフセットし、付け足すモデルとの交点座標を移動座標点とする。座標点同士の距離は相対距離にする事で、元に、3D プリンタの出力量（押出値）の計算式を用いて押出量算出しファイルに記録する。（図 4.3.2-3）

```

144 G1 E0.0 F1800
145 G92 E0
146 G1 X28.2192 Y-6.2007 Z33.0641 E0.0006 F1800
147 G1 X28.1896 Y-6.2371 Z33.0644 E0.0018 F1800
148 G1 X28.1151 Y-6.3228 Z33.0653 E0.0046 F1800
149 G1 X28.0367 Y-6.4048 Z33.0673 E0.0074 F1800
150 G1 X27.9402 Y-6.4957 Z33.0712 E0.0107 F1800
151 G1 X27.8552 Y-6.5679 Z33.0765 E0.0135 F1800
152 G1 X27.7448 Y-6.6521 Z33.0833 E0.017 F1800
153 G1 X27.6297 Y-6.7296 Z33.0919 E0.0205 F1800
154 G1 X27.468 Y-6.8228 Z33.1072 E0.0251 F1800
155 G1 X27.3416 Y-6.8846 Z33.1194 E0.0287 F1800
156 G1 X27.2116 Y-6.9386 Z33.1334 E0.0322 F1800

```

図 4.2.3-3 スクリプト実行による出力コードの例

4.2.4 AAM の手順とサンプルプリント

開発した AAM の実行手順の概略とその詳細を次に記す。



図 4.2.4-1 AAM プリントの手順

1. 外装パーツの分解

ロボットの外装パーツを分解しスキャン可能な状態にする。ロボットを図 4.2.4-2 のようにロボット分解を行う。CT スキャンを行う上で、電子基板・モータ・ねじ等、プラスチック部品以外はすべて取り外す。



図 4.2.4-2 AIBO の分解過程

3.データ編集

先工程で取得した 3 次元画像データをモデル変換ソフト”RoiPaint”²²内に
取り込み、編集・変換を行う。(図 4.2.4-5)

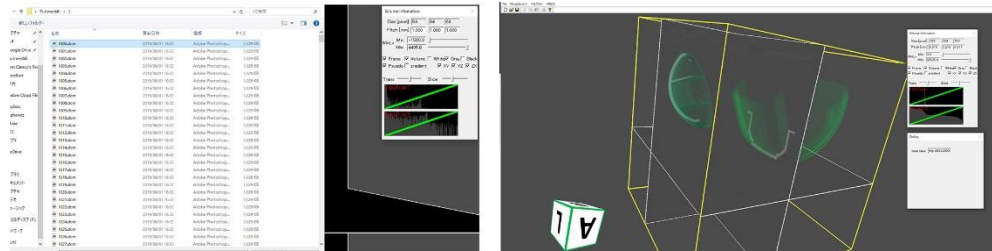


図 4.2.4-5 CT データの編集

変換実行する範囲を指定して STL/OBJ データに書き出す。

出力される 3D モデルデータは頂点数が非常に多い為、次に頂点数を削減し、
扱いやすいデータサイズに変換する。

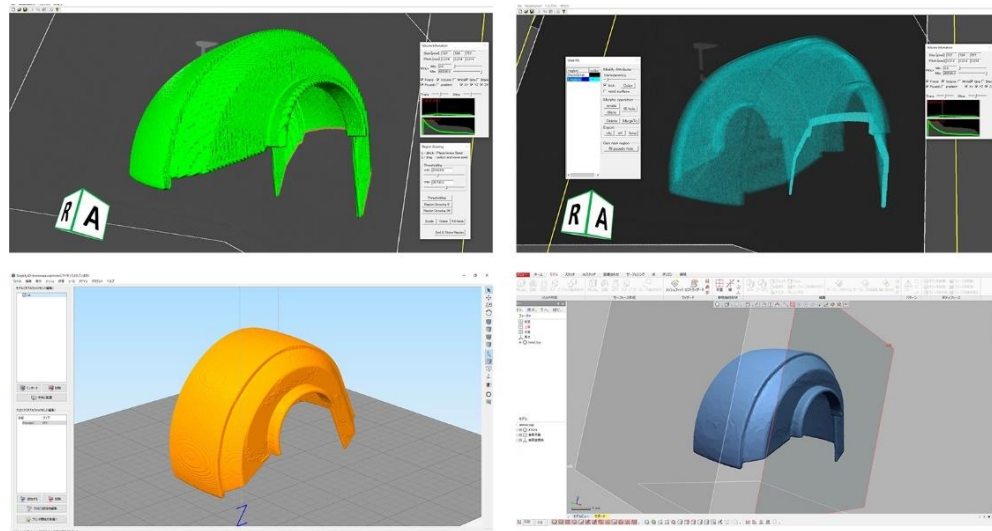


図 4.2.4-6 モデルデータの編集

データの軽量化のみを行う場合はモデルの頂点数(メッシュ数)を削減する
事で改善するが、3 次元画像を元に 3D モデルを生成している為、断層的な凹
凸を持つデータになるため、リバースエンジニアリング用の 3DCAD ソフトを
用いて断層面を平滑にしつつ、頂点数の削減を行う。

4.データインポート

3 で編集した STL ファイルを Rhinoceros にインポートする。

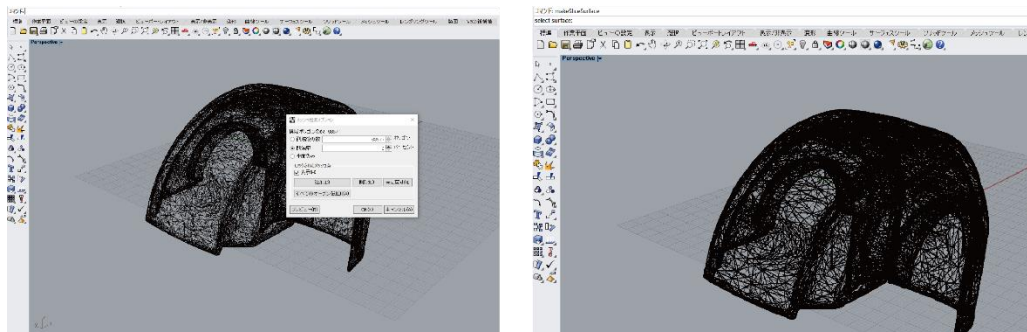


図 4.2.4-7 モデリングソフトへのインポート画面

5.プリント範囲の編集

4.2.3 で別途開発したプリント可能角度のメッシュ範囲のみを残すコマンドによってモデルのプリント範囲を取捨する。(図 4.2.4-8)

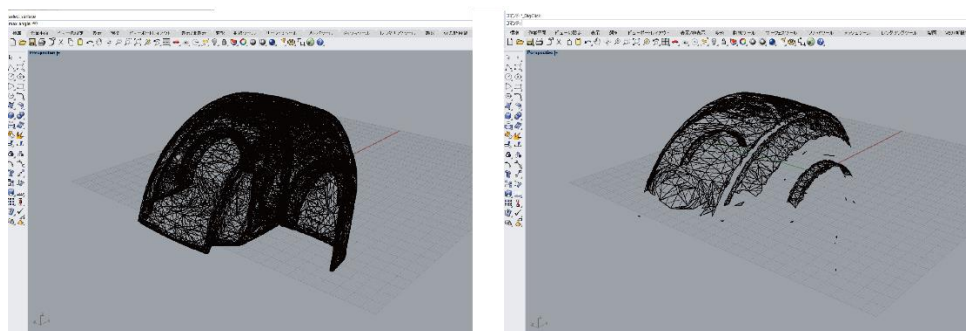


図 4.2.4-8 プリント範囲の選定

6.スクリプト実行

追加したいデザインをモデリングし配置したら(図 4.2.4-9 内の円錐)、AAM スクリプトを実行すると G-Code ファイルが出力される。

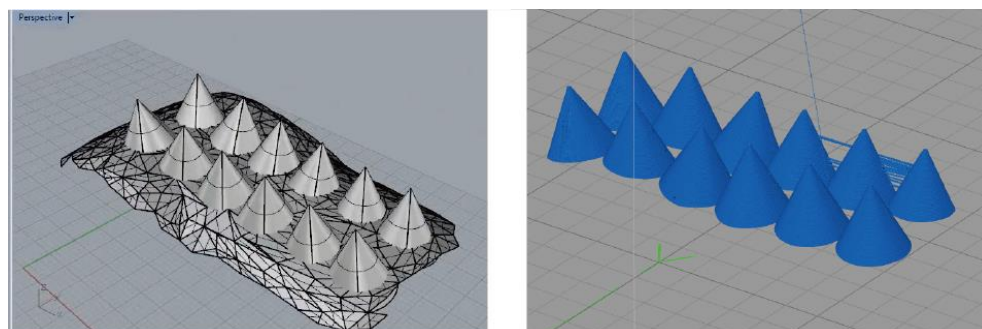


図 4.2.4-9 追加モデリングとスクリプト実行

7.G-CODE 確認

G-Code ファイルをプリンタのコントローラソフトに読み込み、スライスデータを確認しプリント準備をする。

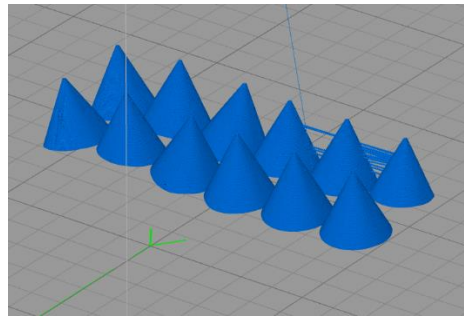


図 4.2.4-10 AAM コマンドで出力された G-CODE

8.プリント実行と原点調整

3D プリンタを PC から操作するソフト（例：Repetier-Host²³）、ベースモデルをプリンタにセットした時の形状とスキャンデータ似ている点にあわせ、位置座標を記録し G-CODE ファイルに追加記録する。

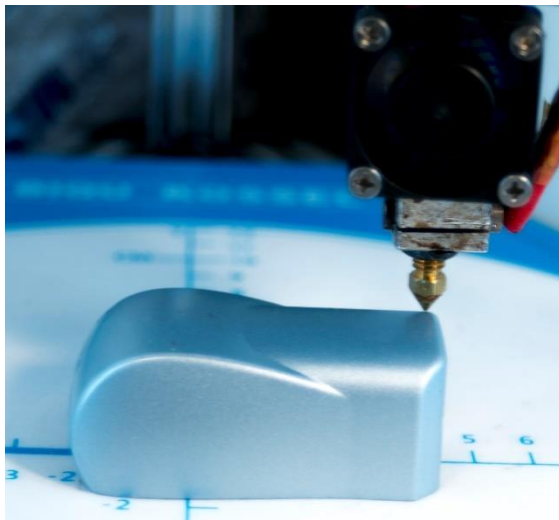


図 4.2.4-11 オブジェクトとの位置調整

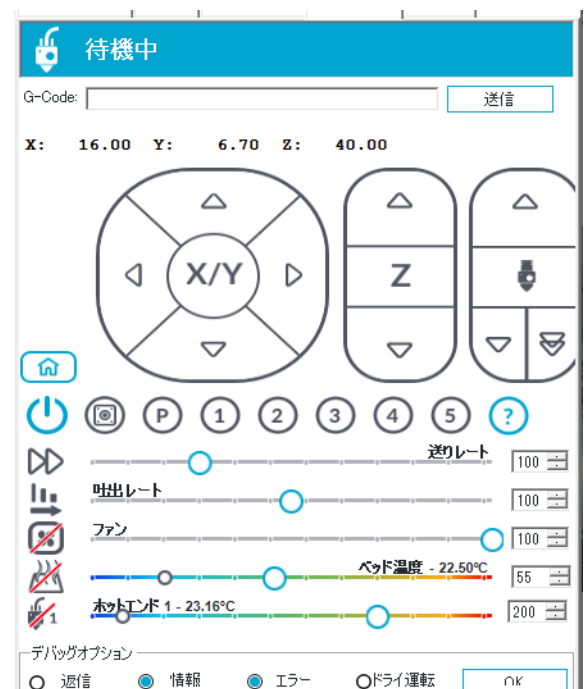


図 4.2.4-12 コントロールソフトによる座標確認

プリントサンプル

AAM を実施したサンプルをいくつか記す。

パソコンのマウスにウサギのプリントを試みる、マウスの表面は ABS 樹脂で、同じ ABS 材をプリントした。

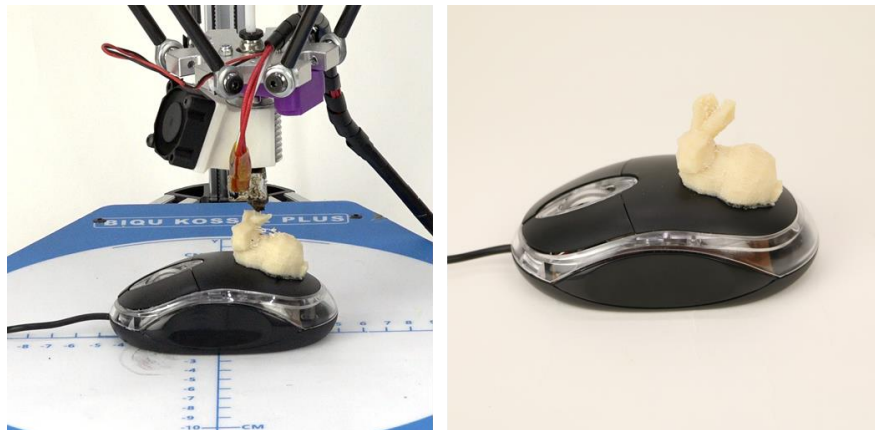


図 4.2.4-13 マウスにウサギを AAM した図

食品調理用の蓋を自立させるための足を付加する。

蓋は PP 製である為 PP フィラメントを用いている。AAM を施したことで、蓋を立てる事が可能となった。

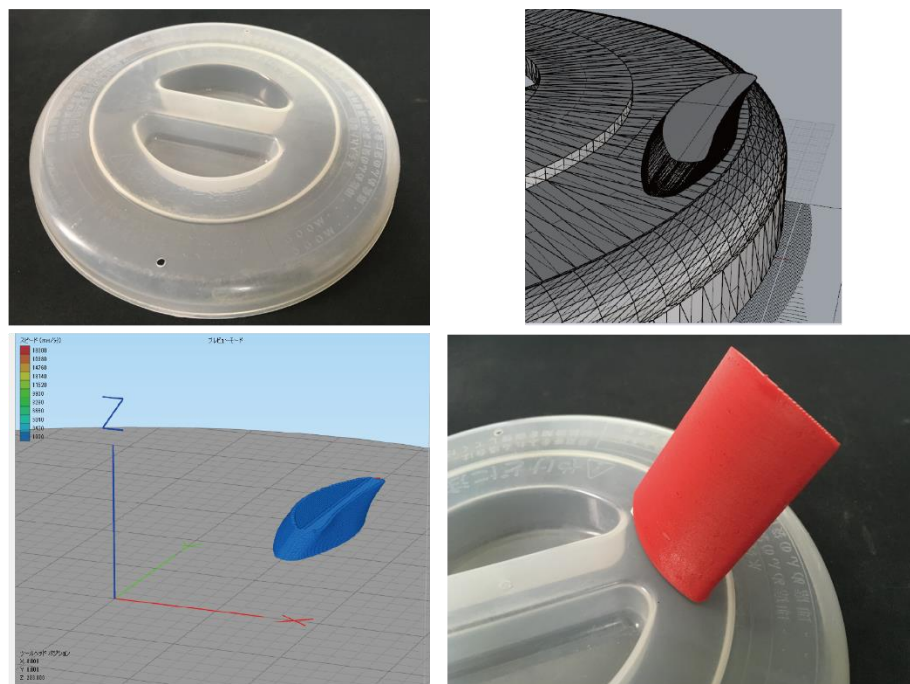


図 4.2.4-14 調理器具に AAM を実施した例

4.3 Additive-Additive-Hair

4.2 で開発した AAM スクリプトを元に 3D プリントヘアをダイレクトプリント可能なスクリプトを開発する。

4.3.1 ヘアプリントの関連研究・事例

3D プリンタを用いたヘアプリントについての事例や関連研究を述べる。

図 4.3.1-1 の①の [13]は、3D モデルの部位を専用のスライサで指定する事により、毛を生成している。②の [14]は、高精細な植毛を施す事で、斜毛効果や面ファスナーのような機能的な毛を出力する事を目的としている。③の [15]は、2つのアーティファクト部分の間を微吐出させ、移動する事で、毛をプリントする事ができる。④は3D モデル共有サイトに投稿されている3D モデル²⁴で、一般的なスライサーを用いるだけでプリントが可能である、画像は²⁵のサイトを参考にさせていただいた。

ヘアプリントの殆どは専用のパス生成ツールを用いているが、ベースとなるモデルと共にヘアプリントするしかない、前章で開発した AAM を改良し用いれば、既製品や既にプリントした3D モデルに対しても植毛が可能である。



図 4.3.1-1 3D ヘアプリントの先行事例一覧

4.3.2 ヘアースライサ開発

4.2.3 項で開発したスライサを元に毛がプリント可能な動作を検討する。FDM 方式の 3D プリンタには、図 4.3.2-1 のような“糸引き”と呼ばれる樹脂がノズルの移動時に垂れ出て、意図しない造形状態が発生する。スライサでは“糸引き”を防止する為に“リトラクト”と呼ばれる動作設定で樹脂をノズル部分から一時的に引き抜き、樹脂垂れを防止している。

4.3.1 項の先行研究でもこの“樹脂垂れ”状態を利用しヘアープリントを生み出している。③のヘアープリントは樹脂を少量吐出し平面方向に移動させオブジェクト同士の 2 点間を結び、毛をプリントしている。本スライサは AAM スライサをベースにして図 4.3.2-2 のように高さ方向への移動を組み合わせ、移動距離を増やす事で 1 点の接着のみで毛のプリントが可能と推測する。

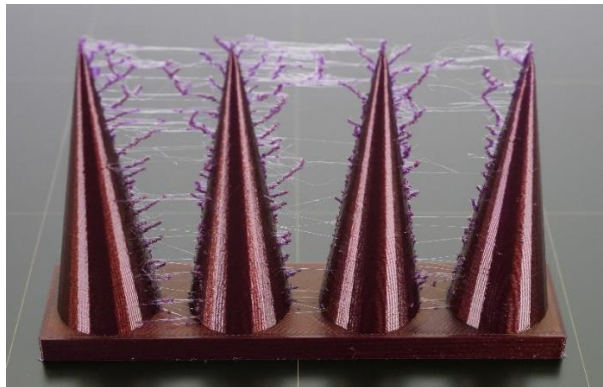


図 4.3.2-1 ノズル移動による樹脂垂れのサンプル ²⁶

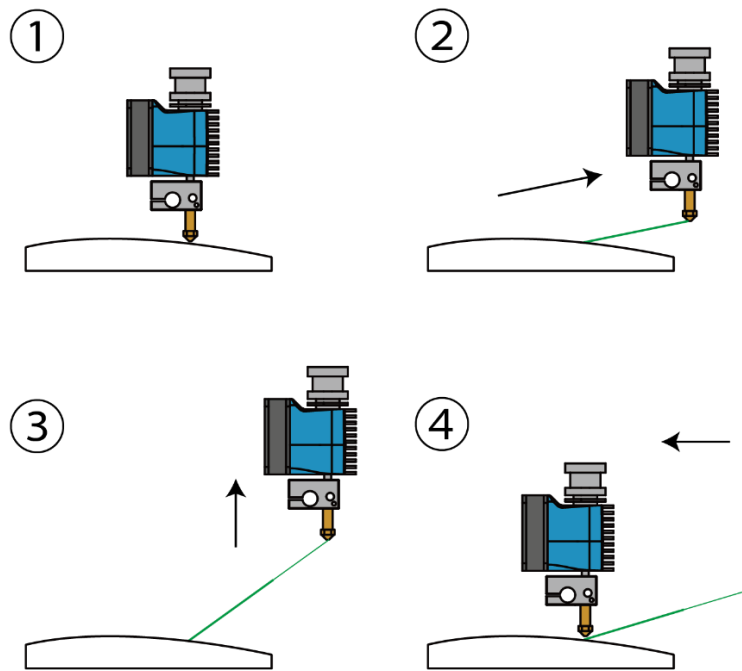


図 4.3.2-2 スライサのヘッド移動予想図

図 4.3.2-2 で考案した動作を元にスクリプトの実装を行った。
 モデルに対し等間隔で一定方向(例：Y 軸)に輪郭線を引き、輪郭線上に再度等
 間隔（例：X 軸）に点をプロットする。プロットした点に対し図 4.3.2-2 の動
 作コード付加し、モデル全体の点に実施する。(図 4.3.2-3)

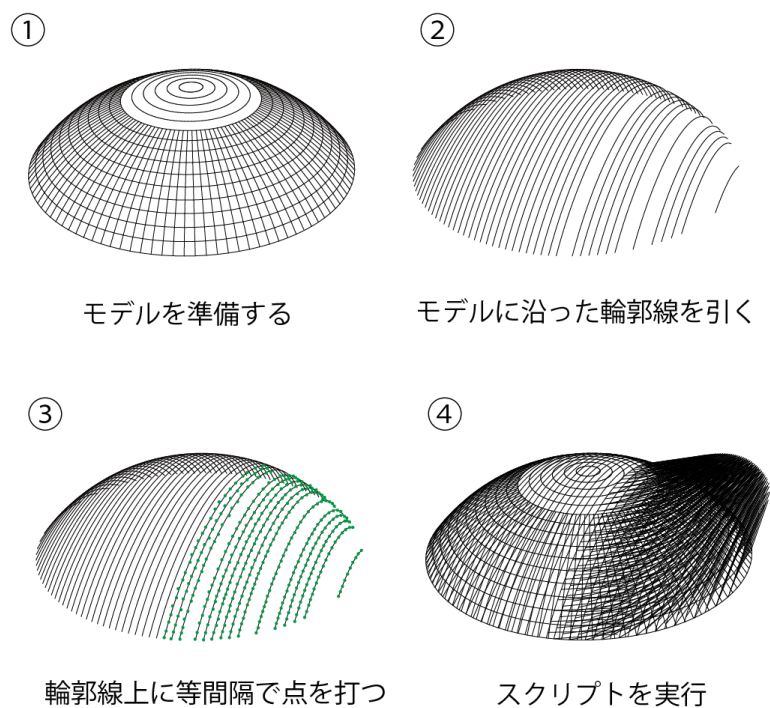


図 4.3.2-3 AAH のスライサ解説

出力された動作ファイルの移動経路を図 4.3.2-4 に示す。図の上部にあるツールパスが植毛後の移動経路となる。

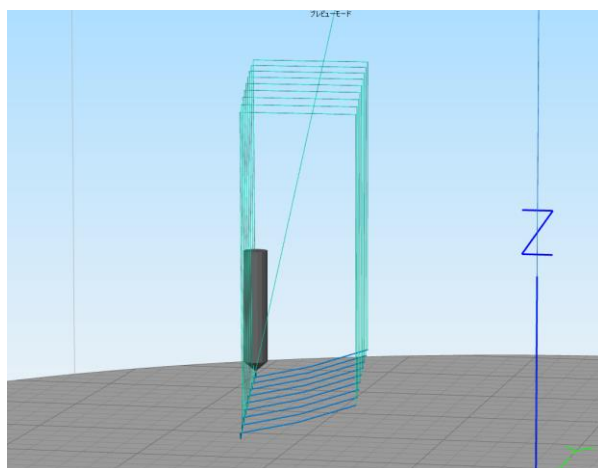


図 4.3.2-4 ヘアスライスのツールパス画面

4.3.3 ヘアプリントサンプル①

開発したスクリプトを用いたヘアプリントのサンプルを次に示す。

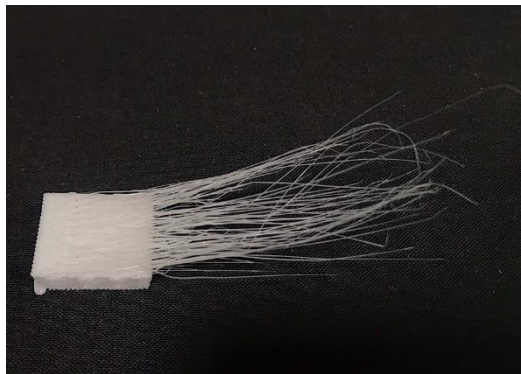


図 4.3.3-1 ヘアプリント

毛を出力した後に、手や定規を使って引き延ばすとさらに細かい毛を出力する事ができる。0.2mm ノズルで出力される毛の太さは一番細い時で、0.077mm 程であった。(図 4.3.3-2)

日本人の平均的な髪の毛の太さは 0.08 mm 程²⁷ で、人毛に近い太さの毛を出力する事も可能となった。



図 4.3.3-2 ヘアプリントの毛の太さ測定

4.3.4 4 軸プリントシステム開発と自動カット化

4.3.3 で製作したプリントヘアーのような長い毛を生成するためには半自動で生成を行っていた。ヘアープリントの効率化、及び様々なパラメータでの生成を可能にする為に自動カットを可能にする機構・システムを考案し、押出部に新たな動作軸を追加する事で可能であると推測した。(図 4.3.4-1)

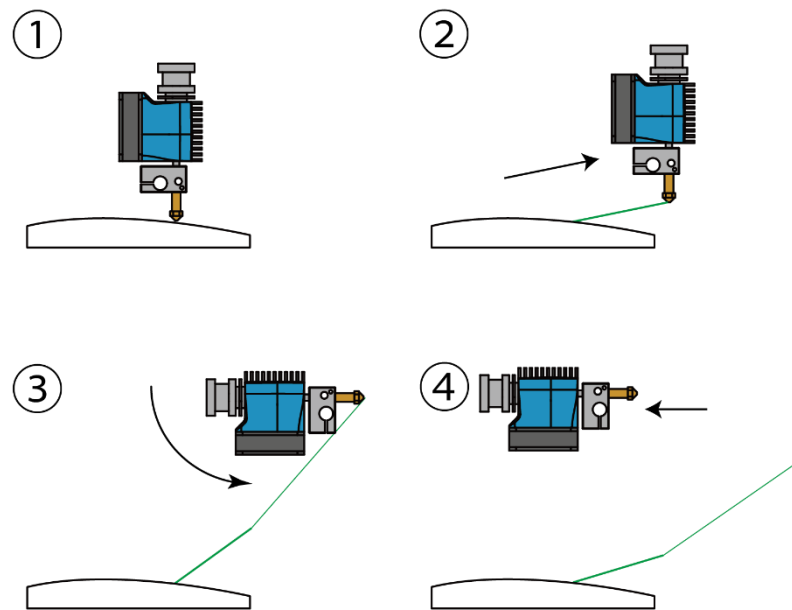


図 4.3.4-1：4 軸プリントによる毛の自動カット予想図

駆動軸にサーボモータを採用することで、ヘッド部の重量を軽量かつ小型で改造する事が可能となる、またシリアル通信方式のサーボモータにする事で角度・移動速度等を制御する事が可能となる。

・4 軸押出部の設計と実装

図 4.3.4-1 のような動作をデルタ型プリンタで行うヘッド部品を設計する。複合軸を持つ加工機や 3D プリンタはプリントテーブルに回転軸を持つ事例が多いが、図 4.3.4-1 の動作の為、回転軸をヘッド部分に持たせたユニットを設計し、図 4.3.4-2 に示す。

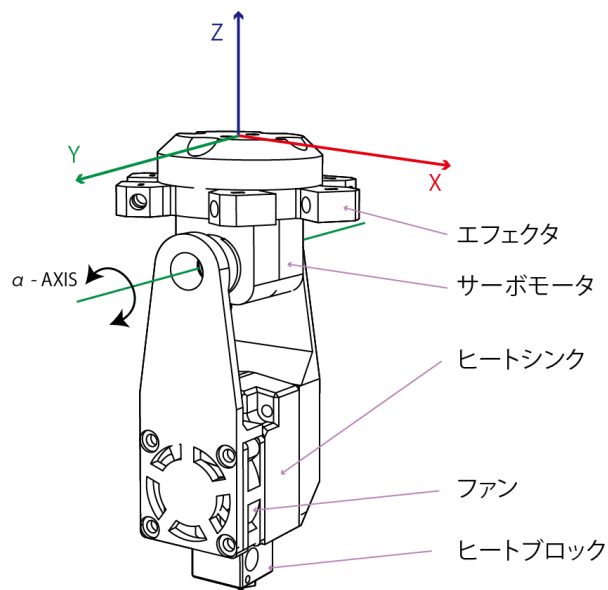


図 4.3.4-2 : 4 軸ヘッドの設計図

サーボモータを 1 つ取り付ける事で、 α -AXIS 方向に回転可能となる。

・シリアルサーボモータ制御のファームウェア開発

サーボモータを駆動させるシステムを実装する。サーボモータには 2 種類の方式があり(表 4.3.4-1)、PWM 方式は角度しか指定できないが、シリアル方式は回転速度や角度を任意に制御する事が可能で毛のプリントと自動カットの動作を複数のパラメータを組み合わせで行う為、シリアル方式のサーボを採用するが、オープンソース型 3D プリンタのファームウェアとして最も使用されているファームウェア“Marlin”は PWM 方式のサーボモータを接続できるが、シリアル通信方式サーボを動作させる方法は存在しない、本章では通信・動作を可能にするファームウェアを開発した。

表 4.3.4-1 サーボモータの仕様違い

	最大接続個数	回転精度	回転速度制御
PWM 方式	5 個	1.42 deg	×
シリアル方式	127 個	0.1 deg	○

3D プリンタのコントロールボードに搭載されているシリアル通信ピン

にシリアルサーボを接続する。ファームウェアでも専用のシリアル接続が可能となるように改変する。接続回路図を示す。

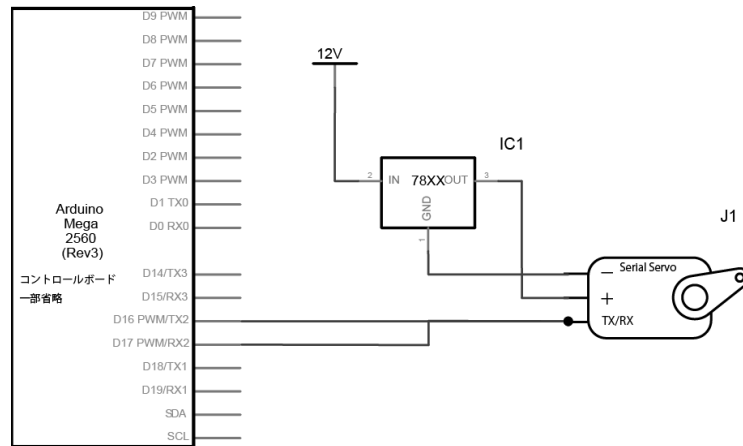


図 4.3.4-3 コントロールボードとモータの接続回路図

シリアルサーボはメーカーが規定した通信プロトコルを使用し、G コマンドや M コマンドが定義されているメインファイルにコードを記述する。

改編したファームウェアのコードについては付録に記す。

またファームウェアは github で公開している。

https://github.com/alotomo/Marlin_Futaba_SerialServo

・スライサの M-CODE 動作対応化

前述で定義した M コマンドの例を次に記す。このコマンドをヘアースライサに組み込むことで、プリント中にシリアルサーボを稼働させる事が可能となった。

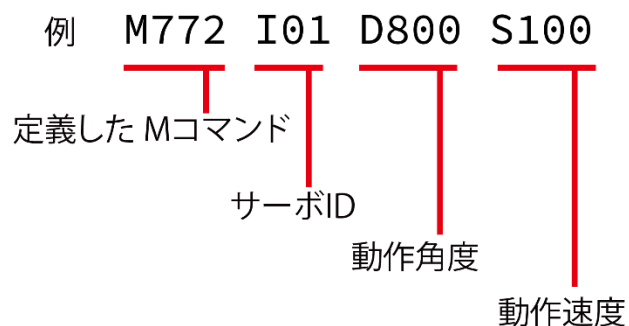


図 4.3.4-4 実装した M-Code の解説

4.3.5 ヘアプリントサンプル②

4.3.4 で開発したシステムを用いたヘアサンプルを次に記す。

・PLA 製ヘアー

PLA 樹脂を用いた場合、吐出時の温度によって触感や吐出される毛の品質が変異する、PLA の一般的な吐出温度の平均値は 200℃程である。低温(180~200℃まで)で出力するとザラザラと硬い出力になり、硬い毛になる。一方、高温(200~220℃まで)で出力すると、さらさらとした柔かい毛となった。

(図 4.3.5-1)



吐出温度 180℃



吐出温度 190℃



吐出温度 210℃



吐出温度 220℃

図 4.3.5-1 吐出温度の差異と毛の品質の違い

高温(220°C)で出力した場合、樹脂の糸引き状態が維持しやすく、毛を非常に長く出力する事が可能な為、図 4.3.5-2 のように 25cm 程までの長い毛を出力出来る。



図 4.3.5-2 PLA 製のロングヘアー

・ABS 製ヘアー

ABS 樹脂のベースモデルに ABS ヘアーをプリントする。ABS 樹脂の吐出は 230°C程が一般的であるが、吐出温度は 240°Cにする事で図 4.3.5-3 のような毛を出力出来る。



図 4.3.5-3 ABS 製ヘアー

・TPU 製ヘアー

PLA 製のベースモデルに TPU 樹脂のヘアーを出力する。

本来 AAH は、同素材の出力が望ましいが、PLA と TPU は出力温度に近い為、PLA 製のベースモデルに植毛する事が出来た。

TPU の吐出温度は 180℃であるが、190℃の設定で出力が可能となった。



図 4.3.5-4 TPU 製ヘアー

PLA・ABS・TPU それぞれのヘアープリントを通して一般的な吐出温度よりも 10~20℃程高く設定する事で、長い毛やさらさらとした毛を出力する事が可能であると考えられる。

5 外見的变化の例

5.1 AAM による外見変化



図 5.1-1 AIBO にカスタマイズした例

角を生やした外装は、ロックミュージックやパンクロックを好む人、ファッションデザイナーのクリスチャン・ルブタンが制作する、アイテムのような状態になった。

5.2 AAH による外見変化①



図 5.2-1 AIBO に植毛した例

5.3 AAH による外見変化②



図 5.3-1 マウスに植毛した例

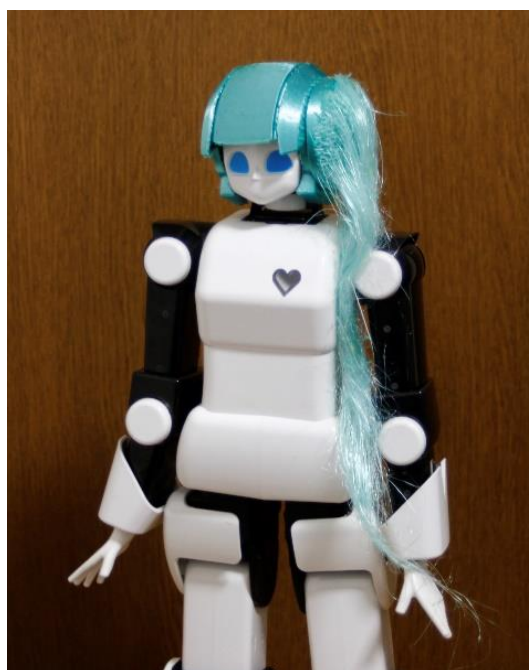


図 5.3-2 人型ロボットの頭部に植毛した例

6 評価と考察

前章で製作した外装プリントについて、これまでに、様々な学会・展示会・コミュニティイベント等に参加し製作物を持ち込み、見学者からの実際にサンプルを触った意見や、反応をもらい、フィードバックを受けてきた。これらの結果、本研究における外装変化の見え方やロボットの外装研究としての立ち位置とその考察を行う。

6.1 展示とコミュニティイベントの参加

6.1.1 CHI2018 展示

本研究成果を Human-Computer Interaction (HCI) 研究の世界最大の学会である、the CHI Conference 2018 に投稿し [16]、2018 年 4 月 24 日 カナダ モントリオール 国際展示場で実物展示を行った。投稿した LBW はポスターセッションであったがプリントサンプルをポスターと共に置き、3D プリンタ分野やロボットに関する研究者から意見をもらった。



図 6.1.1-1 学会での展示の様子

・論文採用時及びポスターセッションでのコメント

- ・ソフトとウェア的に成長させる関連論文は存在するがハードウェア的に成長させる研究はなく、独自性を持っている。
- ・パーツを分解することなく表面に 3D プリンタを用いて形を変異させる事は 3D プリンティングのテクノロジーとして画期的である。

6.1.2 Maker Faire Tokyo2018 展示

モノづくりのコミュニティイベントである、Maker Faire Tokyo(以下MFT)(オライリージャパン主催)で製作したロボットを複数台、展示を行った。一般参加者とロボット開発者からの意見を代表例的に記述する。



図 6.1.2-1 MFT2018 展示の様子

一般参加者：

犬型ロボットを欲しいと思ってきたが、好きなものではなかった、しかし、毛が生えていたら、欲しいと思った、犬を飼っている身としては、自分が好む毛の毛並みや触り心地があり、その毛に合わせる事が出来たら、“ロボットペット”としてより、家族としての存在を感じだろう。

ロボット開発者：

毛が生えているのは非常に興味を持てた、しかし関節に毛が絡むや廃熱など、機械的問題が発生する可能性を感じてしまう。ロボットに服を着せる事や、色を塗る等のユーザーカスタマイズはメーカーとして黙認している範囲もある。所有者の個性に完璧に合わせる事は出来ないので、このようなカスタマイズは今後、需要が増えるかもしれない。

6.1.3 ロボットコミュニティイベントでのデモ

コミュニケーションロボット等に興味を持つ人が集まるイベントが SNS 等のコミュニティ機能を活用して開催されている。

筆者は、前章までに製作した AIBO をロボットコミュニティに持ち込み、実際に普段からロボットと触れあっている人から意見をもらった。



図 6.1.3-1 毛が生えた AIBO を触ってもらっている様子

・意見の例

・体験者が持っているロボットは服を着せたり、色を変えたりする程度であったが、3D プリンタを用いれば、個性豊かなオリジナルのロボットを作り出すことができると知って、非常に興味を持った。

・毛が生えたロボットは想像以上に気色悪く感じた、サイバネティクスなデザインのロボットだから、AIBO を気に入っているのに、生物に似せるのは好きではない。

・3D プリンタで形状を変えられるのは好感を持てるが、3D プリント技術やモデリングスキル等がない人では非常に高レベルで、これまでの色や着せ替えなどの手芸工作の範囲が楽しめる範囲で楽しむ方が良い。

6.2 考察

ロボットに AAM・AAH を行った結果と展示等から考察を行う。本研究で開発した手法は様々な外装的用途として扱えるため、応用先の分別とその評価を行う。

6.2.1 カスタマイズとしての外見の変異

5.1 章で製作した図 5.1-1 は、角や半球を体表に取り付けたことで、犬型ロボットの外装を変化する事が出来た。角を生やした外装は、パンクロック等を好む人や男性からの好評が多かったが、“気味が悪い”や“トゲトゲしていて痛そうで好まない”など否定的な意見もあった。また、クリスチャン・ルブタンのデザインするシューズ(図 6.2.1-2)²⁸ やアイテムにロボットが似ているという意見も女性から多く受けた。

コミュニケーションロボットは、1.1.1 で述べたように、デザインの選択肢を減らし平均化したデザインで研究・販売されてきた為、本研究で実施した AAM によってカスタムした外装に対し“好意”や“不快感”を抱く事自体にユーザの個性や好みに合わせる事の出来るマスカスタマイズ性ではないだろうか、外見の変異において、カスタマイズを持たせる事が可能となった。



図 6.2.1-1 トゲトゲの AIBO



図 6.2.1-2 クリスチャン・ルブタンの靴^[28]

6.2.2 模倣としての外見の変異

犬型ロボットの外装や人型ロボット頭部に植毛した時(図 6.2.2-1)・(図 6.2.2-2)、模倣している生物の形、犬型ロボットはより犬らしく、人型ロボットは、人間やキャラクター(この場合、電子楽曲・音声ソフトのイメージキャラクターである初音ミクを用いた)に近づける事に取り組んだ。

2.5 で述べた、毛から得られるアニメシー知覚の事例のように、植毛行為をロボットの外装に施す事で、より強くアニメシーを得られると筆者は考察する。



図 6.2.2-1 AIBO 植毛前：左 と植毛後：右



図 6.2.2-2 初音ミク²⁹: 左 とプリメイド AI: 右

植毛した AIBO に対してヘアカットを行った。ロボットに生えた毛をトリミングする事は、おそらく世界で初の取り組みとなった。



図 6.2.2-3 ヘアカットをする前の AIBO



図 6.2.2-4 ハサミでヘアカットをしている様子

6.2.3 自己成長としての外見の変異

第3章で構築した、3Dプリンタを用いた外的変化の概念に基づく、AIやロボットによる自己成長的要素で最も重要となる外見生成アルゴリズムについての実験結果と考察を述べる。外見の変異のソフトウェア部分について、守矢氏が執筆した論文[17]中の”成長過程モデリングのための深層学習“の章で開発したシステムを用いる。図6.2.3-1のように、3Dモデルが、図中の0番から10番のステップでモデルが変異していく。

システムの詳細について本論では省略する。

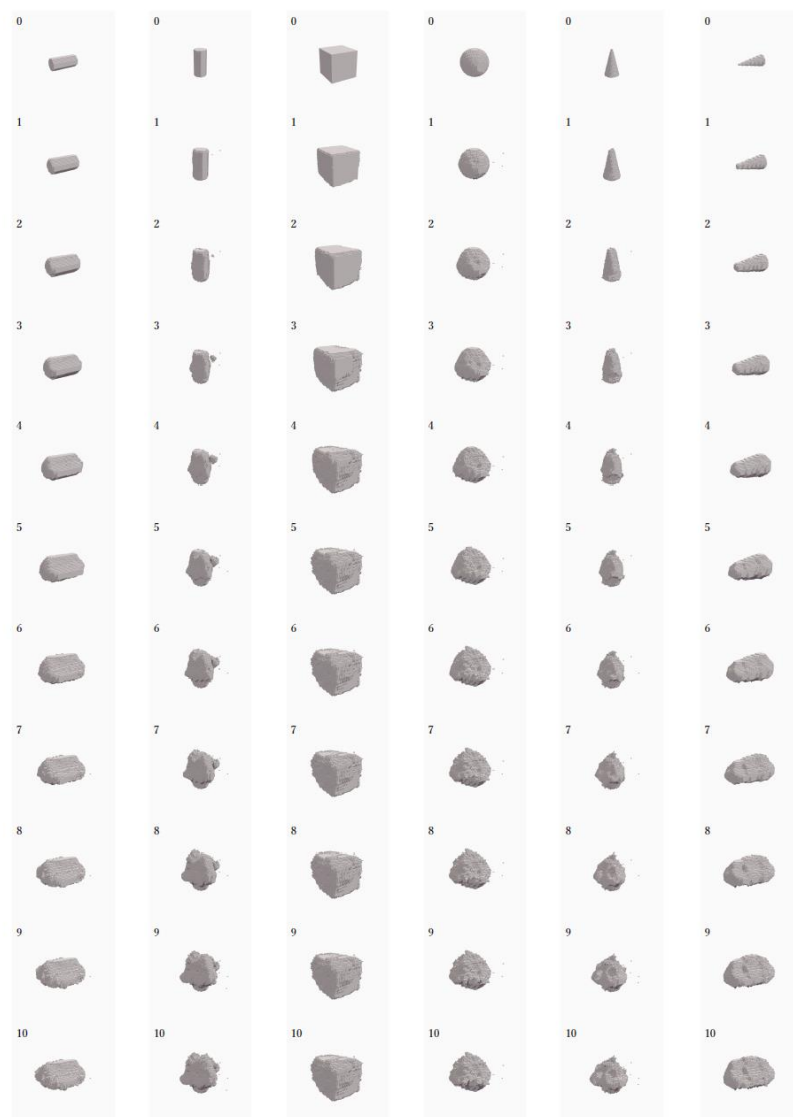


図 6.2.3-1 深層学習によって生成したモデル

成長過程モデリングでは、生物の形状データを元に、収縮処理と呼ばれる方法を用いて、成長過程を疑似的に生み出し、3Dモデルが機械学習によって成長するようなアルゴリズムの生成とモデル製作を行った。

生成された3Dモデルを段階的な差分としてそれぞれプリントしたものを図に示す。



図 6.2.3-2 成長モデルの差分を3Dプリントした図

AAMを用いた成長的プリントは、ここで生成した3Dモデルの構造や条件では不可能であったが、AIが3Dモデルを生成し、自己成長として形を生成する事が可能であると本実験で証明した。

このモデリング技術は、コミュニケーションロボットの収集する、ユーザとの会話データや、感情データに紐づける事が出来れば、6.2.1章のようなカスタマイズデータを生成する事が可能となると筆者は推測する。

6.2.4 ロボットの身体的成長する未来シナリオと取り組み

前章までで述べた AI モデリングや AAM・AAH を総合的に用いた、筆者が考案する未来のコミュニケーションロボットとの関わり方をイラスト的にシナリオで解説し、取り組みについて触れる。

シナリオ概要

ロボットに搭載される人工知能が進化し、生物の形をした、コミュニケーションロボットから、掃除ロボット(図 6.2.4-1)まで、知性として“自我”や“個性”を認識可能となった未来において、家庭用ロボットは、3D プリンタが搭載された充電ドックをステーションとして用いる事になっているだろう(図 6.2.4-2)、ユーザから収集できるパーソナルデータを元にロボットの身体拡張・表現として3D プリンタで外見を変異させ、ロボットと人の関わり方が変異し、機械と人との距離や関係性が親密になっているだろう。(図 6.2.4-3,図 6.2.4-4)



図 6.2.4-1 掃除ロボット³⁰

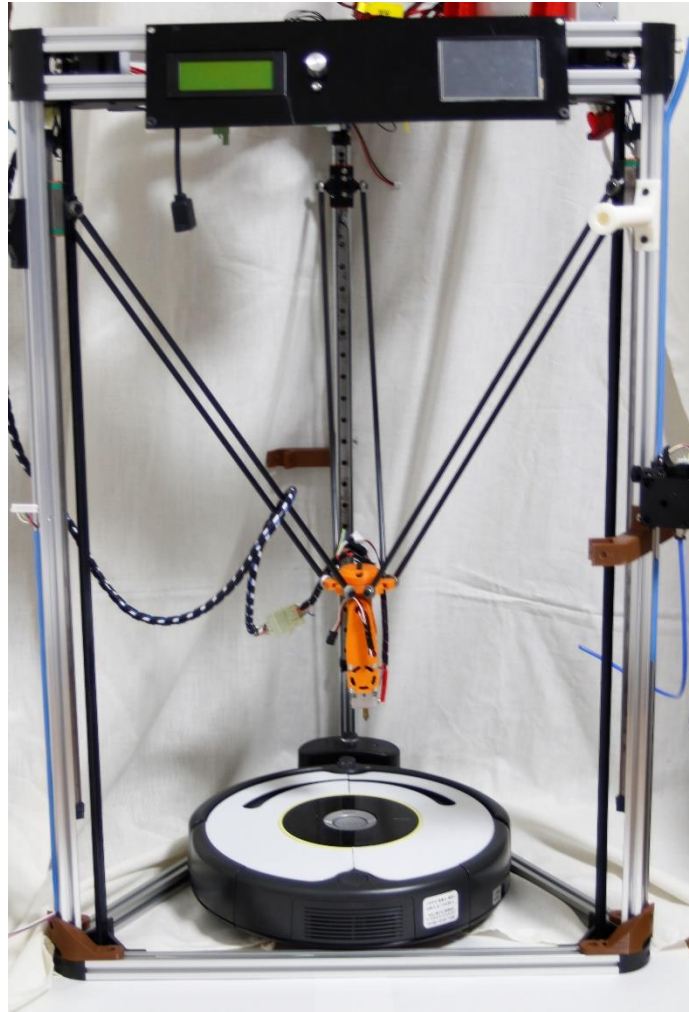


図 6.2.4-2 充電ステーションと 3D プリンタを組み合わせた装置

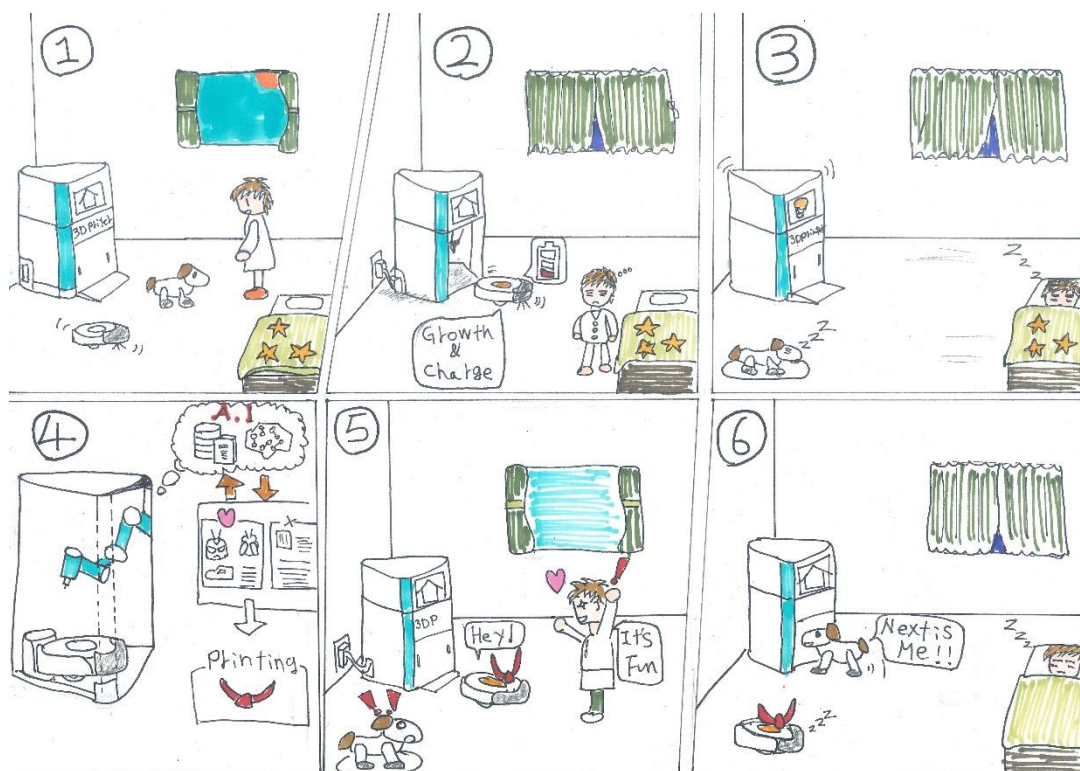


図 6.2.4-3 未来シナリオ①

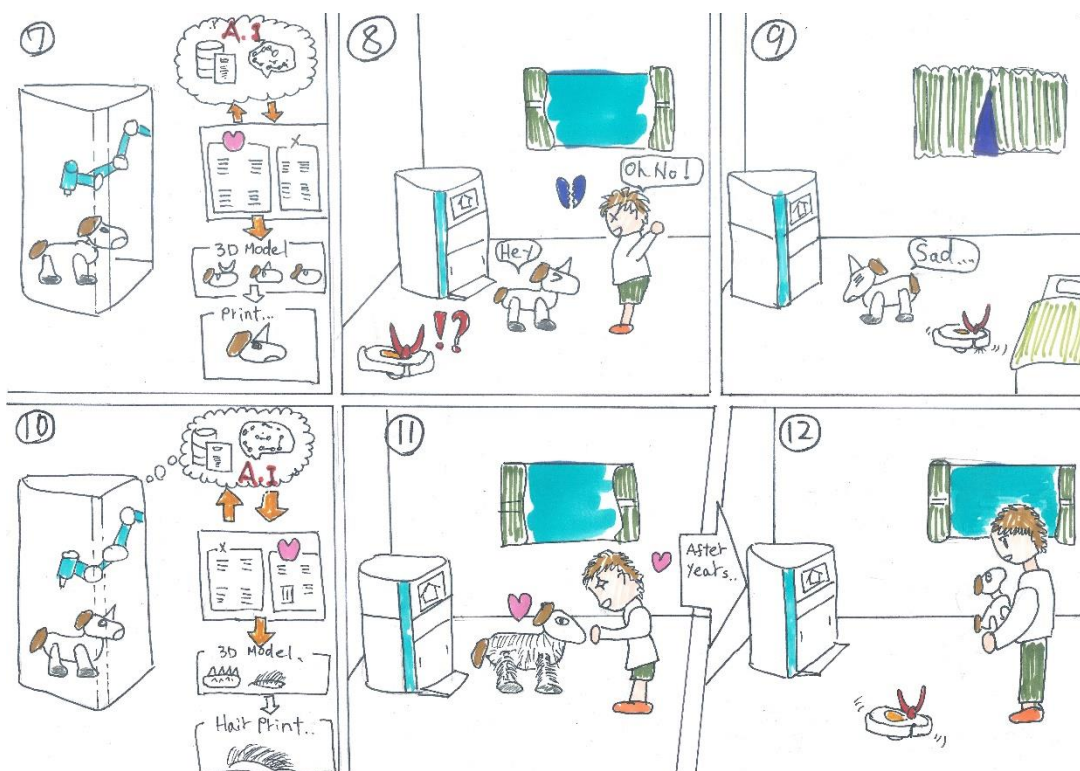


図 6.2.4-4 未来シナリオ②

6.3 今後の展望

本研究で開発した AAM・AAH はプリント出来る条件が非常に限られ、デスクトップ型 3D プリンタでは不可能な形状が多かった、しかしロボットアーム式 3D プリンタを用いる事で、より多くの外装やモデルに実行できる為、今後、ロボットアーム式で取り組みたいと考えている。また、AAM は同素材なら修復や拡張が可能のため、大型の 3D プリント物（イス・橋等）の補修や拡張に適していると考ええる。これもロボットアームを用いた大型装置で可能になるため、合わせて取り組んでいきたい。

7 まとめ

本論文では、コミュニケーションロボットが抱える、デザイン的な問題点と、ロボットに対して発生している様々な事例を挙げ、整理を行った。次に、これらの事例からコミュニケーションロボットの将来的な概念を構築し、現在不足している技術について、述べた。そして、3Dプリント技術“Additive-Additive-Manufacturing”の実装と製作を通して、コミュニケーションロボットの外装を変化させるための手法の一つとして、本研究で実装した技術の可能性と応用性を述べ、その発展性や今後の課題について記した。

ロボットに関する研究は非常に歴史が長く、そして分野も広く扱われる。人類が、人を模した装置を生み出し、産業や生活を豊かにする目的として製作が始まったモノであるが、今やその形は、人間の思考力を超えた働きを期待して日々研究が行われている。筆者は、コミュニケーションロボットに強い関心と興味を持ち、具現化されているロボットとSFや物語で描かれる像から、外装や見た目に関する違和感や技術的な課題を思い、本研究を実施する運びとなった。国際学会の場やロボット研究を行う研究者の方々に本研究で製作したロボットを見せ、インタビューやコメントを受けた時に、本研究で構築した概念が非常に好評であったことから、本研究のロボット分野における新たな取り組みの一つとして、製作する事が出来たと思う。

謝辞

本研究及び関連する様々な活動に際し、多くの方に意見や強力を頂いた事にここに感謝いたします。

本研究の主査である、田中浩也教授には、筆者が研究に関するアイデアを含めた大学院進学に関する相談時から、研究活動、国際・国内学会等のなど、終始にわたり熱いご指導を頂き、深謝申し上げます。

また、副査を受けて頂いた、高汐一紀教授、水野大二郎(元)准教授、副査の変更を快く引き受けて頂いた、脇田玲教授には、ロボット分野における本研究に対する評価、デザイン思考的評価や考察の仕方など、複数分野からの観点を持ち研究を進められた事、誠に感謝いたします。XD プログラムに関する各教員の先生方、同プログラムに所属する学生方には、新たな発見や斬新な意見を多く頂き、研究の深みを増す貴重な時間となりました。

本研究におけるコア技術である、AAM のスライサ開発を行って頂いた、高盛竜馬さん、国際学会等の活動に協力して頂いた江口 壮哉くんには大変感謝しております。田中浩也研究室の OB・OG を含めた皆さんにも、数多くの事で共に切磋琢磨し、同じ研究のメンバーとして活動できた事に感謝します。

技術的な協力と指導を頂いた、エス.ラボ株式会社の柚山精一さん、釜井正太郎さん。CT スキャンの撮影協力をいただいた、クロスエフェクト株式会社様、材料提供や数多くの情報共有をして頂いた、キョーラク株式会社・SFC 研究所員の湯浅亮平さん、機材や活動拠点を提供して頂いた SFC 研究所 NU 関内ラボの皆様に感謝いたします。

最後に、大学院進学・研究活動に関し、金銭的・生活的に多くの支援をしてくれた家族に感謝いたします。

2020 年 1 月 9 日

脇本智正

参考文献

- [1] 長田, 純一; 對馬, 隆介; 山口, 智治; 笹間, 亮平, “人文系研究のためのコミュニケーションロボットの開発(1),” 日本デザイン学会 デザイン学研究, 2018.
- [2] 森, 政弘;; 不気味の谷, エッソスタンダード石油 (株) , 1970 年, pp. 33-35 頁.
- [3] 檜垣, 巧, 日本的アニミズムと宗教的自然観, 165 号 編, 1989, pp. p.1-31.
- [4] 植田 , 一博;; アニマシー知覚:人工物から感じられる生物らしさ, 第 巻 31, 2013, pp. p. 833-835.
- [5] 凌. 中山 , 哲. 馬場, 外見の変化によるアニマシーの知覚変化, 情報処理学会 インタラクション, 2016, pp. p.539-541.
- [6] M. Fujita, “AIBO: Toward the era of digital creatures,” The International Journal of Robotics Research, 2001.
- [7] H. Ishiguro, Geminoid - tele-operated android of an existing person -, 2007.
- [8] 柴田, 崇徳, 動物型ロボットを用いた心のケア「ロボットセラピー」, 電子情報通信学会誌 = The journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2012.
- [9] N. Chersini, , N. J. Hall , C. D. L. Wynne, “Dog Pups’ Attractiveness to Humans Peaks at Weaning Age,” Anthrozoös, Routledge, 2018.
- [10] S. Mueller, M. Fritzsche, J. Kossmann, M. Schneider, J. Striebel and P. Baudisch, "Scotty:Relocating Physical Objects Using Destructive Scanning, Encryption, and 3D Printing,," In Proceedings of TEI '15, pp. 233-240., Demo at TEI'15, 2015.
- [11] K. Yamamoto, R. Iwasaki, T. Minagawa, R. Kawamura, B. Ryskeldiev , Y. Ochiai, “BOLCOF: Base Optimization for middle Layer Completion of 3D-printed Objects without Failure,” In Proceedings of SIGGRAPH '18, New York, NY, USA, 2 pages., 2018.

- [12] W. Gao, T. Zhang, C. D. Nazzetta, K. Ramani , J. R. Cipra, “RevoMaker: Enabling Multi-directional and Functionally-embedded 3D Printing using a Rotational Cuboidal Platform,” In Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Charlotte, NC, USA, 2015.
- [13] Gierad , Laput; Xiang, Chen; Chris, Harrison, 3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers, and Bristles, UIST '15 User Interface Software & Technology, 2015, pp. pp 593-597.
- [14] Jifei, Ou; Gershon, Dublon; Chin-Yi , Cheng; Felix , Heibeck; Karl , Willis; Hiroshi , Ishii, Cilllia: 3D Printed Micro-Pillar Structures for Surface Texture, Actuation and Sensing, t. 2. C. Conference, 編, 2016.
- [15] 高橋, 治輝; 宮下, 芳明;, ブリッジ構造と樹脂の引き伸ばしを用いた高密度な毛構造の造形手法, WISS 2017, 2017, p. 81.
- [16] Wakimoto, Tomomasa; Takamori, Ryoma; Eguchi, Soya; Tanaka, Hiroya,, Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'",, vol. Paper No.: LBW110 , Publication:CHI EA '18: Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing SystemsApril 2018 , 2018, p. Pages 1–6.
- [17] 守矢, 拓海, 深層ニューラルネットワークと行う対話型手描き 3D モデリング, 第巻 TM@2018@3477, keio University, 2018.

図表引用

図 1.1.1-1 2017 年のコミュニケーションロボットの産業規模の予想図	2
図 2.1-1 AIBO のカスタマイズ例	5
図 2.1-2 3D モデルシェアサイトでの検索結果	5
図 2.2-1 AIBO ファッション例 1 2001 年頃	6
図 2.2-2 Robohon 服	6
図 2.2-3 Papper 商用向けファッション	7
図 2.3-1 AIBO のお葬式の様子	8
図 2.4-1 知的成長するペットロボット	9
図 2.4-2 サーバサービス終了による知能低下問題 ^[12]	9
図 2.5.1-1 ジェミノイド[5]	10
図 2.5.1-2 パロ [6]	10
図 2.5.2-1 糸毛の車 ^[13]	11
図 2.5.2-2 HAIRIEST CAR ^[14]	11
図 2.5.3-1 Qoobo ^[15]	11
図 2.5.3-2 ガンダムナドレ ^[16]	11
図 3.1-1 コミュニケーションロボット現在の形	12
図 3.2-1 ソフトウェア面とハードウェア面を組み合わせた新しい形	13
図 3.2-2 知的・外見的成長が可能なロボットの構想図	13
図 4.1-1 Additive & Subtractive Machine	14
図 4.1-2 回転型複数面プリント	14
図 4.1-3 スキャナを用いた追加印刷技術	14
図 4.2-1 Additive-Additive-Manufacturing の概要	15
図 4.2-2 平面スライサ(左) 曲面スライサ (右) の違い	15
図 4.2.1-1 産業用小型 CT スキャナ	16
図 4.2.1-2 3D スキャンシステム ^[18]	16
図 4.2.1-3 ハンディ型スキャナ ^[19]	16
図 4.2.2-1 3D プリンタの造形種類	17
図 4.2.2-2 FDM 方式プリンタ駆動方式の違い	17

図 4.2.2-3 方式違いによる造形エリアの差異	18
図 4.2.2-4 本研究で用いるデルタ型 3D プリンタ	18
図 4.2.2-5 部品名称、及びプリント角度の違い.....	19
図 4.2.3-1 スライサの違い	20
図 4.2.3-2 AAM スクリプトの概要図	21
図 4.2.3-3 スクリプト実行による出力コードの例.....	21
図 4.2.4-1 AAM プリントの手順.....	22
図 4.2.4-2 AIBO の分解過程	22
図 4.2.4-3 外装パーツの分解例	23
図 4.2.4-4 CT スキャンの経過図①.....	23
図 4.2.4-5 CT データの編集.....	24
図 4.2.4-6 モデルデータの編集	24
図 4.2.4-7 モデリングソフトへのインポート画面.....	25
図 4.2.4-8 プリント範囲の選定	25
図 4.2.4-9 追加モデリングとスクリプト実行	25
図 4.2.4-10 AAM コマンドで出力された G-CODE.....	26
図 4.2.4-11 オブジェクトとの位置調整	26
図 4.2.4-12 コントロールソフトによる座標確認	26
図 4.2.4-13 マウスにウサギを AAM した図	27
図 4.2.4-14 調理器具に AAM を実施した例	27
図 4.3.1-1 3D ヘアードプリントの先行事例一覧	28
図 4.3.2-1 ノズル移動による樹脂垂れのサンプル	29
図 4.3.2-2 スライサのヘッド移動予想図.....	30
図 4.3.2-3 AAH のスライサ解説	31
図 4.3.2-4 ヘアードスライスのツールパス画面	31
図 4.3.3-1 ヘアードプリント	32
図 4.3.3-2 ヘアードプリントの毛の太さ測定.....	32
図 4.3.4-1 : 4 軸プリントによる毛の自動カット予想図.....	33
図 4.3.4-2 : 4 軸ヘッドの設計図	34
図 4.3.4-3 コントロールボードとモータの接続回路図	35

図 4.3.4-4 実装した M-Code の解説	35
図 4.3.5-1 吐出温度の差異と毛の品質の違い	36
図 4.3.5-2 PLA 製のロングヘアー	37
図 4.3.5-3 ABS 製ヘアー	37
図 4.3.5-4 TPU 製ヘアー	38
図 5.1-1 AIBO にカスタマイズした例	39
図 5.2-1 AIBO に植毛した例	39
図 5.3-1 マウスに植毛した例	40
図 5.3-2 人型ロボットの頭部に植毛した例	40
図 6.1.1-1 学会での展示の様子	41
図 6.1.2-1 MFT2018 展示の様子	42
図 6.1.3-1 毛が生えた AIBO を触ってもらっている様子	43
図 6.2.1-1 トゲトゲの AIBO	44
図 6.2.1-2 クリスチャン・ルブタンの靴 ^[28]	44
図 6.2.2-1 AIBO 植毛前：左 と植毛後：右	45
図 6.2.2-2 初音ミク：左 とプリメイド AI：右	45
図 6.2.2-3 ヘアカットをする前の AIBO	46
図 6.2.2-4 ハサミでヘアカットをしている様子	46
図 6.2.3-1 深層学習によって生成したもでる	47
図 6.2.3-2 成長モデルの差分を 3D プリントした図	48
図 6.2.4-1 掃除ロボット	49
図 6.2.4-2 充電ステーションと 3D プリンタを組み合わせた装置	50
図 6.2.4-3 未来シナリオ①	51
図 6.2.4-4 未来シナリオ②	51
表 4.3.4-1 サーボモータの仕様違い	34

出典

¹ 矢野経済研究所

https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/1668

² アニメ 攻殻機動隊 SAC

<http://www.ntv.co.jp/kokaku-s/sac/index.html>

³ ゴーストはどこに宿るのか？日本のコミュニケーションロボットとカルチャー関係

<http://boundbaw.com/world-topics/articles/49>

⁴ アニマシーについて

http://www.cs.c.u-tokyo.ac.jp/r_animacy.html

⁵ AIBO カスタマイズの例

http://www.bekkoame.ne.jp/i/n.mondo/room/ten_06.html

⁶ thingiverse

<https://www.thingiverse.com/search?q=robi&dwh=265dfe5a8126d87>

⁷ ロボペウェア AIBO 服 1

<http://robope.com/products/>

⁸ メルカリ ロボホン

<https://www.mercari.com/jp/search/?keyword=%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%9B%E3%83%B3>

⁹ ロボユニ

<https://robo-uni.com/product-category/pepper/>

¹⁰ A I B O、君を死なせない 修理サポート終了「飼い主」の悲しみ

<https://dot.asahi.com/aera/2014072800041.html>

¹¹ アイボが仲間に向けて読経 ロボット犬56匹、安らかに

<https://www.asahi.com/articles/photo/AS20191203001864.html>

¹² タカラトミーアーツ Ohanas 通信サービス終了

<https://www.takaratomy.co.jp/products/omnibot/ohanas/>

¹³ 糸毛の車

<http://heian.cocolog-nifty.com/genji/2009/01/post-e02c.html>

¹⁴ Hairiest car

<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/hairiest-car/>

¹⁵ ユカイ工学

<https://qoobo.info/>

¹⁶ 機動戦士ガンダム 00 ガンダムナドレ

<http://www.gundam00.net/tv/ms/01e.html>

¹⁷ 株式会社アールエフ NAOMi-CT 001C

http://rfsystemlab.com/product/industry/ct/280_380ct.html

¹⁸ 3D スキャナの仕組みについて

<http://www.d-engineer.com/3dprint/3dsukyana.html>

¹⁹ 3D System 社 RealSense

<https://ja.3dsystems.com/3d-scanners/sense-scanner>

²⁰ 7 Families of Additive Manufacturing

<http://www.hybridmanutech.com/resources.html>

²¹ Rhinoceros

<https://www.rhino3d.co.jp/>

²² RoiPaint

<http://takashijiri.com/SoftRoiPainter3D/index.html>

²³ Repetier-Host

<https://www.repetier.com/>

²⁴ Hairy_Lion の配布元

<https://www.thingiverse.com/thing:2007221>

²⁵ HairyLion について How to 3D print the fabulous and furry lion!

<https://toms3d.org/2017/02/07/how-to-furry/>

²⁶ リトラクトについて

<https://www.prusa3d.com/stringing-and-oozing/>

²⁷ 花王株式会社 髪の毛の太さと断面の形について

<https://www.kao.com/jp/haircare/hair/1-7/>

²⁸ クリスチャン・ルブタンの靴

<https://www.louboutinsaleshoes.org.uk/product/escarpic-6/>

²⁹ 初音ミク

https://ec.crypton.co.jp/pages/prod/vocaloid/about_miku

³⁰ iRobot 社 掃除ロボット Model 620

<https://store.irobot-jp.com/item/620.html>