

戦略的創造研究推進事業
ERATO
追跡評価用資料

「五十嵐デザインインタフェース」
プロジェクト
(2007.12～2014.3)

研究総括：五十嵐 健夫

2020年3月

目次

要旨	1
プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況（まとめ図）.....	2
第 1 章 プロジェクトの概要.....	3
1.1 研究期間.....	3
1.2 プロジェクト発足に至る科学技術および社会の背景.....	3
1.2.1 科学技術の背景.....	3
1.2.2 社会の背景.....	4
1.3 プロジェクトのねらい.....	5
1.4 研究体制.....	7
1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義.....	8
1.5.1 映像表現グループの研究.....	8
1.5.2 生活デザイングループの研究.....	15
1.5.3 ロボット行動デザイングループの研究.....	25
1.5.4 まとめ	35
第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況.....	36
2.1 各研究テーマの現在の状況に関する基礎データ	36
2.1.1 調査方法	36
2.1.2 競争的研究資金の獲得状況.....	37
2.1.3 論文の発表状況.....	41
2.1.4 特許の出願・登録状況.....	47
2.1.5 招待講演	52
2.2 各研究テーマの進捗状況.....	53
2.2.1 五十嵐グループ.....	53
2.2.2 三谷グループ.....	73
2.2.3 稲見グループ.....	85
2.2.4 本プロジェクトに参加した研究者の発展的研究.....	89
2.2.5 海外研究者のプロジェクト後の研究例.....	99
2.3 プロジェクト参加者の活動状況.....	106
2.4 第 2 章のまとめ.....	108
第 3 章 プロジェクトの成果の波及と展望.....	110
3.1 科学技術への波及と展望.....	110
3.2 社会経済への波及と展望.....	111
3.2.1 理念の伝播.....	111
3.2.2 ベンチャー事業.....	112
3.2.3 人材の育成.....	113

3.2.4 メディアを介した研究成果の発信.....	114
【引用文献】	120

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業の ERATO「五十嵐デザインインタフェースプロジェクト」(2007年12月～2014年3月)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)事業及び事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

本プロジェクトは、「メディア芸術の創造の高度化を支える先進的科学技術の創出」という戦略目標のもとで、ユーザーインタフェース研究の立場から一般ユーザーによる創造的活動を支援する Computer Graphics(CG)・Computer Aided Design(CAD)・ロボティクスにおける新たな技術基盤の構築を目指すものである。

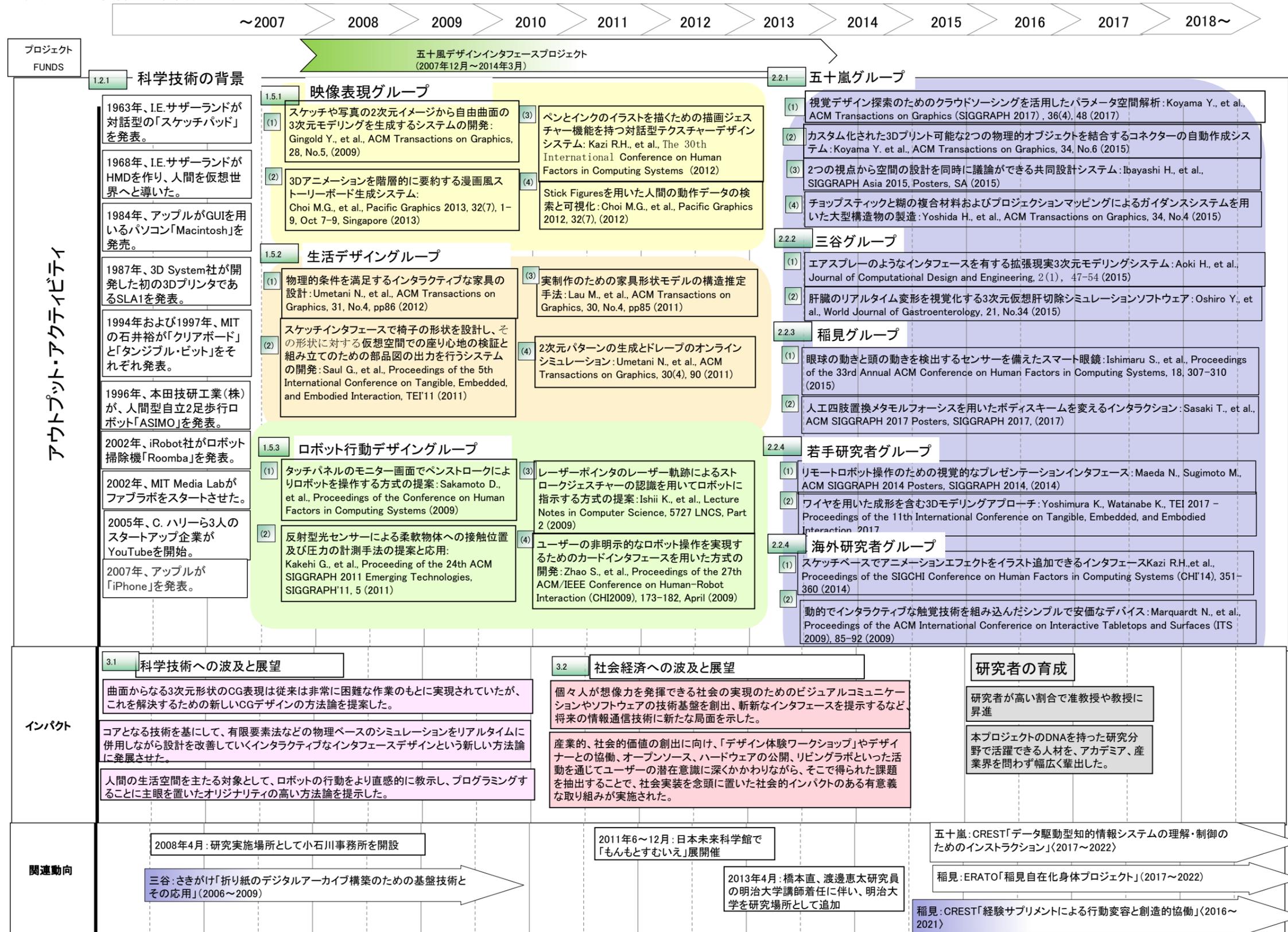
本プロジェクトの研究目標は、「これまででない高度なビジュアルコミュニケーションおよび自己表現を手軽に行うことを可能にするソフトウェア技術基盤を築き、個々人が創造力を発揮できる社会を実現すること」である。この研究目標達成のため、(1)3次元表現やアニメーション表現などを手軽に行うための「映像表現のための技術」、(2)実世界において日常的に使用する道具や生活用品を自らデザインできるようにすることを目指す「生活デザインのための技術」、(3)今後家庭に入ってくると予想されるロボットに対して、一般のユーザーが行動を指示するための方法についての「ロボット行動デザインのための技術」について研究が行われた。

この結果、スケッチによる入力によるCGデザインを容易に行えるヒューマンインタフェース、非人工物の物体の設計を行うための新しいCADヒューマンインタフェース、ロボットに行動をより直感的に教示するためのインタフェースなど、これまででない新しいデザインインタフェースの技術基盤を確立し、実用化へ向けた潮流を生み出した。

本追跡調査では、プロジェクト終了後における研究者の研究の継続と発展状況を知るために、2018年度における各種データベースを基に、研究助成金の取得状況、論文の発表や特許の出願と登録等を調査した。また、データだけでは知りえない情報(プロジェクトの研究成果とその後の研究成果との関連、科学技術的及び社会・経済的波及効果等)を得るために、研究総括およびグループライダーへのインタビューを行った。さらにプロジェクトと直接関係のない有識者への面談を行い、外部から見た本プロジェクトの成果の意義や波及についての情報を収集した。

第1章では、プロジェクト発足に至る科学技術や社会背景、プロジェクトの狙いや研究体制をレビューし、プロジェクト終了時点での研究成果の主だったものについて各研究グループごとに説明する。第2章では、プロジェクト終了時点から5年間の間にプロジェクトに参加した国内及び海外の研究者によってなされた研究の中から、期間中の研究の継続あるいは発展と思われる研究の状況や成果をレビューする。第3章では、プロジェクトの成果の科学技術や社会経済への波及を考察する。

プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況（まとめ図）



第 1 章 プロジェクトの概要

1.1 研究期間

ERATO 実施期間は 2007 年 12 月～2013 年 3 月で、その後引き続き 1 年の特別重点期間が設けられたので、研究期間は 2014 年 3 月までである。

1.2 プロジェクト発足に至る科学技術および社会の背景

1.2.1 科学技術の背景

ユーザーインタフェース進化の歴史はまさに直感的に操作のできるインタフェースの開発の歴史と言える。

グラフィックスによって人とマシンとの対話を初めて可能としたのは、1963 年にアイヴァン・サザーランド(Ivan Edward Sutherland)が発表した「スケッチパッド」である。その翌年の 1964 年には、ダグラス・エンゲルハート(Douglas Carl Engelbart)がマウスを発明し、その形態はいまだに変わることなく使用されている。1979 年、MIT メディアラボの前身である Architecture Machine Group のクリストファー・シュマント(Christopher Schmandt)教授らは、洗練されたコンピュータとの対話のための簡単で会話的なインタフェースを目指して、音声とジェスチャーの双方向システム「Put That There」を開発した。ユーザーはこれによって、大型のビデオディスプレイ上のグラフィカルデータベースを構築および変更が可能になった。

1984 年に Apple 社が発表した GUI を用いたパソコン「Macintosh」は、グラフィックスを用いたマシンとユーザーインタフェースを身近なものに変えた。また、NTT ヒューマンインタフェース研究所の石井裕は、1994 年に距離を越えて協同描画ができる「クリアボード」を、そして、MIT メディアラボ移籍後の 1997 年には、形のない情報に直接触れることのできる「タンジブル・ビット」を発表した。さらに、2007 年に Apple 社から出された「iPhone」は、タッチ型インタフェースを持ちインターネットと常時接続できるという、それまでの携帯電話の概念を一新するもので、その後の世界を変えることになった。

一方、感覚的な臨場感を得るための様々なインタフェースの研究として、1968 年にアイヴァン・サザーランドは最初の仮想現実(VR: Virtual Reality)と拡張現実(AR: Augmented Reality)であるヘッドマウントディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)システムを作り、仮想世界へのビジョンを示した。1991 年にイリノイ大学が発表した CAVE(Cave Automatic Virtual Environment)¹は、ウェアラブル型ではなく部屋の壁の全方位に映像を投影して没入環境を構築する初めての VR システムである。2007 年に Google がグーグルマップに導入

¹ Immersive Projection Technology と呼ばれる視点を自由にできるというインタラクティブ性を備えた仮想現実の方式で、約 3 メートル四方の立方体で構成された空間内のスクリーンに立体的に CG 映像を表示させて、仮想現実を体験できる。

したストリートビューは、一般のユーザーが手軽に全方位パノラマ撮影されたストリートの風景を体験できることで実用化が進んだ。

VR をロボットの操縦に応用したのが、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の舘璋によって 1984 年に初めて紹介された「トレイグジスタンス」である。これは遠隔地にある物（あるいは人）があたかも近くにあるかのように感じながら、操作などをリアルタイムに行える環境を構築する技術およびその体系である。

産業用のロボットではなく、一般ユーザーが最初にロボットに身近な関心を覚えたのは、1996 年に本田技研工業が発表した人間型自立 2 足歩行のできるロボットの ASIMO によってであろう。また、1999 年にソニーが発表したエンタテインメントロボットである Aibo は、価格が高いこともあってそれほど普及しないままに 2006 年には販売が打ち切られた。しかし、2002 年に iRobot 社が発売したロボット掃除機「ルンバ」は、その実用性によって家事をロボットに任せられることを証明し、将来様々な形のロボットが一般のユーザーと共存する時代の到来をうかがわせた。このことは、それまでの作る側の立場からのロボットに関する技術開発に欠けていた、ロボットにどのように動作を指示するかという使う側に立った研究の必要性を示唆するものである。この意味で本プロジェクトが取り上げた「ロボットの行動を自分用にデザインすることを可能にするための技術開発」は、時代を先取りしているといえる。

1.2.2 社会の背景

パソコンのペイントソフトが一般ユーザーに身近になったのは、1987 年に発売された Macintosh II がグラフィック機能を強化してフルカラーで処理できるアプリケーションを搭載したのが始まりである。3 次元グラフィックスの技術もその頃にはゲーム制作を中心に盛んにおこなわれるようになっていた。デジタルカメラで撮った写真を、写真編集ソフトを使って加工することは、一般の人でも面倒をいとわなければ行うことができる。パソコンのお絵かきソフトを使いこなす人も少なくない。このようなハードやソフトが手に届くコストで手に入り、身近に使えるようになったのは、20 世紀が終わろうとする頃である。

動画共有サービスである YouTube が開業したのは 2005 年 2 月で、同じ年の 11 月に公開されたナイキの広告動画の再生回数が 100 万に達した。この YouTube は、多くのプロでない一般の人々の創作意欲を刺激することになった。デジタルカメラやビデオカメラによる映像のみならず、2 次元や 3 次元のアニメーションなどの個人で制作した作品を YouTube で公開する人たちが増えている。

しかしながら、映画の CG に使われるような複雑な映像表現を行ったり、実世界の物体をコンピュータでデザインしたりすることは、一般の人には容易ではなく、多くの場合は専門家の手にゆだねられている。さらに、日本の文化が色濃く反映されている漫画やアニメなどにおけるビジュアルな表現やコミュニケーションといった視覚情報分野では、これらの強みを生かしたソフトウェアやプラットフォームの開発および発信を進めていくことは

重要である。

1980年代に開発された3Dプリンタは2009年頃から低価格かつ高性能な製品が発売されたことにより急速に普及した。またデジタルデータを基に様々な部材加工を行うことができるレーザーカッターも、データを用意すれば比較的容易に利用できるようになった。

MITメディアラボのCenter for Bits and Atomsが2002年にスタートしたファブラボは、almost anythingをつくることを目標とした3Dプリンタやカッティングマシンなど多様な工作機械を備えたワークショップであり、日本でも2010年に「つくる文化」や「つくる技術」を広めていくことを目標に、FabLab Japan Network²が設立され、各地に設立されたファブラボと連携をとった活動をしている。これらの「つくる文化」すなわち「自分が欲しいものは自分で作る」という思想は、「つくる技術」の普及に伴い、今や特別なものではなく一般的な概念として定着しつつある。

以上のように、技術の発展を背景に、与えられたものを使うだけでなく、欲しいものあるいは必要なものをユーザー自らの感性と想像力によってデザインあるいは創作し、そしてそれらを自己表現として発信すること、すなわち個人が自己の創造力を発揮して自らの生活を豊かにする文化は必然的なものであると同時に、国としての競争力の根源となり得るものである。この実現のために、本プロジェクトの目的である「これまでにない高度なビジュアルコミュニケーションおよび自己表現を手軽に行うことを可能にするソフトウェア技術基盤を築き、個人が創造力を発揮できる社会を実現すること」が設定された。

1.3 プロジェクトのねらい

本プロジェクトでは、次の3つの技術に関する研究を進めた。

(1) 映像表現のための技術

3次元形状表現やアニメーション表現などを手軽に行うための技術の研究開発を行う。これらの表現はこれまでプロの手で作られてきたものであるが、革新的な技術を提供することによって、一般のユーザーが簡単に作成することが可能となり、社会生活におけるさまざまな場面での視覚的情報伝達を豊かにすることが期待できる。

3次元形状表現に関しては、最適化手法を利用した曲面生成アルゴリズムの応用を目指す。最適化手法とは、曲率の全体の変化率を表す評価関数を設計し、その値が最小になるような最適化計算によって曲面の形状を決定するという手法で、具体的には最適化問題を線形な問題で適切に近似し、それを近年実用化がすすんでいる疎行列計算ライブラリを利用して高速に解くというものであり、これによって曲面を含む立体形状の対話的なデザインが可能となる。アニメーションについては、「直接ユーザーが手で対象物を動かしている様子を記録してそれをアニメーションに用いる」という手法を開発する。基本的なアイデ

² グローバルなファブラボネットワークのうちの日本語で情報交換するコミュニティ。
<http://fablabjapan.org/>

アについてはすでに実証済みであるので、実際に意味のあるアニメーション作品をつくることのできる技術の開発を行う。特に、いかにして複数の動きの同期をとるか、一度作成した動きをどのように修正するかといった点に技術的な課題があり、これらの解決を目指す。

(2) 生活デザインのための技術

実世界において日常的に使用する道具を自らデザインできるようにすることを目指す。工場で大量生産された商品をお仕着せのように使うのではなく、情報処理技術を駆使して自分が本当に欲しい自分にぴったりの「物」を手に入れることが可能となる。将来的には、生産・流通機構の改革とあわせ、「物をデザインする」プロセスをエンドユーザー側にもってこることのできる社会の実現を目指す。

従来、重さ、慣性、柔軟性、大きさといった実体の持つ制約を計算機に取り込むことは、物理シミュレーションという枠組みで行われてきた。本プロジェクトでは物体のデザインのプロセスに実世界の制約を取り入れるために、モデリング中に実時間でシミュレーションすることを提案する。このようなシミュレーションの使い方はあまり世界的にも例がなく、計算機技術の新しい使い方として革新的なものといえる。本研究ではあえて「物理的に正確なシミュレーション」や「視覚的に効果的なシミュレーション」のどちらでもない、「デザイン作業を支援することに特化した必要最低限のシミュレーション」に焦点をあわせることで、これまで不可能と思われていたアプリケーションの実現を目指す。

(3) ロボット行動デザインのための技術

今後家庭に入ってくると予想されるロボットに対して、一般のユーザーが行動を指示するための方法について研究する。これまでのロボットの研究は、歩行や物体把持などを実現するためのハードウェアと、入力を元に判断し行動を生成するソフトウェアの研究が主であったが、本研究ではロボットと人間との間で情報をやり取りするための方法の研究を行う。

具体的には個別の動作を指示するためのインタフェース、およびより複雑な動作を教示するためのプログラミング言語の研究を行う。操作のためのインタフェースとしては、画像の上にユーザーが操作や書き込みを行う画像ベースあるいはスケッチベースのインタフェースの開発を検討する。プログラミングについては、画像などのセンサー入力から複雑な実世界の状況を判断し、それを元にアクチュエータの出力を生成して実世界の行動を生成するといったプログラミングと異なるプログラミングパラダイムを提案していく。

これまでロボットの行動は技術者がプログラムしたものをそのまま繰り返すのが基本で、一般のユーザーが個別のニーズに応じて組み替えることなどは困難であったが、従来のプログラミングの枠組みを超えた視覚的で直接的な方法で行動を指示することを可能にする。

1.4 研究体制

「五十嵐デザインインタフェースプロジェクト」は、五十嵐健夫(東京大学)を研究総括として、以下の3つのグループにより構成される。

①映像表現グループ

リーダー：五十嵐健夫(東京大学)

映像表現グループは、3次元形状表現やアニメーション表現などを手軽に行うための技術の研究を行い、最適化手法を利用した曲面生成アルゴリズムの応用や社会生活におけるさまざまな場面での視覚的情報伝達を豊かにするツールの開発を目指した。

実施場所：文京区小石川事務所。2013年1月からは東京大学。

人員³：研究員1名；研究補助者5名

②生活デザイングループ

リーダー：三谷純(筑波大学)

生活デザイングループは、実際の世界に存在する事物のデザインのため、重さ、慣性、柔軟性、大きさなどを物理シミュレーションに取り込む研究や、デザイン作業の支援に特化した必要最低限のシミュレーションに焦点をあわせ、これまで不可能とされていたデザインを行う研究などにより、日常で使用する道具や生活用品を自らデザインできることを目指した。

実施場所：文京区小石川事務所。2013年1月からは筑波大学。

人員：研究員1名；研究補助者3名

③ロボット行動デザイングループ

リーダー：稲見昌彦(慶應義塾大学⁴)

ロボット行動デザイングループは、今後家庭でも広く使われることが期待されているロボットに対して、一般ユーザーが行動を指示する方法についての研究を行い、ユーザーへの負担が少なく操作が容易な方法の開発や、ロボットと人間との間で情報をやり取りするための方法の提案を目指した。

実施場所：文京区小石川事務所。2013年1月からは慶應義塾大学。

人員：研究員3名；技術員1名；研究補助者13名

これら3グループは協力して、図1-1に示すように誰もが想像力を発揮できる社会を目指し、新しいユーザーインタフェースの開発を通して、高度なビジュアルコミュニケーションと自己表現を実現するためのソフトウェア技術の基盤構築を行った。

³ リーダーを除く2013年3月時点の人員数。

⁴ 現在は東京大学。

なお、2013年4月に橋本直と渡邊恵太研究員が明治大学講師に着任したことに伴い、明治大学を研究場所として追加(グループリーダー：渡邊)し、東京大学、筑波大学、慶應義塾大学、明治大学の新体制でプロジェクトを継続した。明治大学における期間中の研究成果は、稲見のロボット行動デザイングループで取り上げる。



図 1-1 本プロジェクト概念図⁵

1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義

本節では、本プロジェクトの研究成果である 128 報の論文のうち、本プロジェクト研究終了報告書において成果を代表する論文として取り上げられたもの、及び被引用数の多い論文を中心に説明する。

1.5.1 映像表現グループの研究

映像表現グループは、3次元形状表現やアニメーション表現などを手軽に行うための技術の研究を行った。「3次元形状表現に関する研究」では、新たな視点として、最適化手

⁵ 本プロジェクト研究終了報告書より引用

法を利用した曲面生成アルゴリズムの応用、具体的には、曲面全体に対してある種のエネルギー関数を最小化する最適化問題を線形問題で近似し、それを近年実用化が進んでいる疎行列計算ライブラリを利用して高速に解くことで、曲面を含む立体形状を対話的にデザインすることを可能にすることを目指した。「アニメーション表現の研究」では、社会生活におけるさまざまな場面での視覚的情報伝達を豊かにするためのツールの開発研究を目的とした。

(1) スケッチや写真の2次元イメージから自由曲面の3次元モデリングを生成するシステムの開発

Gingoldらは、スケッチや写真の2次元イメージから自由曲面の3次元モデルを生成するシステムを提案した^[1]。3次元モデルは2次元画像にプリミティブ⁶とアノテーション⁷を配置することによって作成する。このプリミティブは、一般的に使用されるスケッチの規則に基づいており、ユーザーはモデルの単一ビューを維持することができる。これは既存の3次元モデリングツールに固有の頻繁なビューの変更と伝統的なスケッチベースの両方を排除し、2次元ガイドの画像への入力の一致を可能にする。アノテーション（同じ長さや角度、位置の整合、ミラー対称性、および接続の曲線）は、ユーザーがより高いレベルのセマンティック⁸情報を伝達できるようにして、それを通して本システムは、元のイメージに一貫性がない場合においても一貫したモデルを構築する。

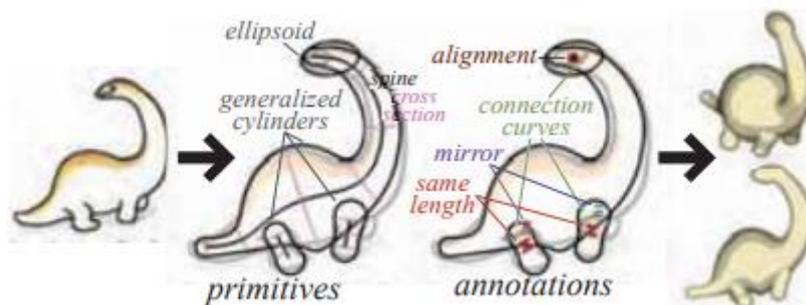


図 1-2^[1] 2次元イメージから自由曲面の3次元モデルを生成

(2) 面を基本要素とした3次元モデリング (Facetons)

通常3次元形状モデリングにおいては、ユーザーはまず空間中に頂点を配置し、それらの頂点間を辺で連結し、さらに辺によって閉じられた領域を面として定義するが、複雑な

⁶ 3次元グラフィックスで、複雑な図形のモデリングを行なう際に構成要素として利用できる単純な図形をいう。ソフトウェアによって利用できる図形の種類は異なるが、平面や多角形、直方体、球、円柱、円錐などがある。

⁷ あるデータに対して関連する情報（メタデータ）を注釈として付与すること。付与したメタデータやタグを指す場合もある。

⁸ コンピュータに文書や情報の持つ意味を正確に解釈させ、文書の関連付けや情報収集などの処理を自動的に行わせる技術。

形状を生成するためにはさまざまな操作を組み合わせ使用しなければならない。Sasakiらは、面要素を基本とした形状表現による3次元モデリング手法「Facetons」を提案した^[2]。システムは、3次元空間中の方向を持った点として表現される面要素の表す平面同士の交線として辺を生成し、これらの辺に囲まれた領域を3次元モデルを構成する面としてユーザーに提示するので、ユーザーは空間中に面要素を配置するだけで3次元形状モデリングを行うことができる。特にモーションキャプチャなどの3次元入力装置を利用した場合、面要素の位置と方向を1操作で指定することができるので、提案手法によって3次元モデリングを非常に効率よく行うことができる。本研究は2013年に、The 19th Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2013)においてBest Paper Awardを受賞した。

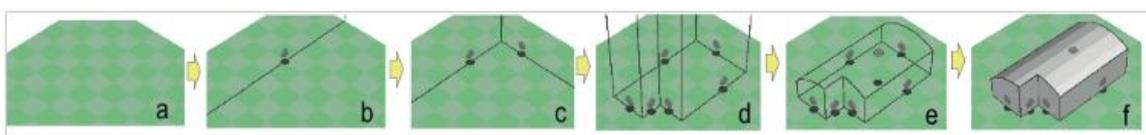


図 1-3^[2] Facetons を用いたモデリング : (a-d)ユーザーは、仮想環境に Facetons を配置することによってモデルを設計する。(e)ユーザーは円筒面を表すプリミティブを配置することもできる。(f)システムは交点でサーフェスを境界付けることによってポリゴンメッシュモデルを構築する。

(3) 仮想空間内で、折り重なった布の上下関係をワンクリックで入れ替えるインタラクション手法の開発

Igarashi らは、仮想空間内で折り重なった布の上下関係をワンクリックで入れ替える 2 つのインタラクション手法を開発した^[3]。1 つ目はレイヤー入れ替え操作で、ユーザーが重なっている領域をクリックすると、マウスマウスカーソルの下の物体の重なり順を変更するものであり、2 つ目はレイヤーに応じたドラッグ操作で、物体のドラッグ中に新たな重なりが発生したときに、ユーザーの操作によってその重なりの上下関係を指定できるというものである。ユーザーインターフェースは 2.5 次元的存在であるが、内部表現は通常の 3 次元形状であり、局所的レイヤー、自己遮蔽、および折りたたみなどが自然に表現される。内部的には、ユーザーによる操作時点でのレイヤー構造を明示的に毎回計算して求め、その構造を変更した上でその結果を 3 次元物体の形状に反映させる。布および紐を操作するプロトタイプシステム上で有効性を示した。本論文は 2010 年 4 月 13 日から 2013 年 3 月 1 日までの Google Analytics でのページビュー数が 7,863 で、全研究中のトップとなった。

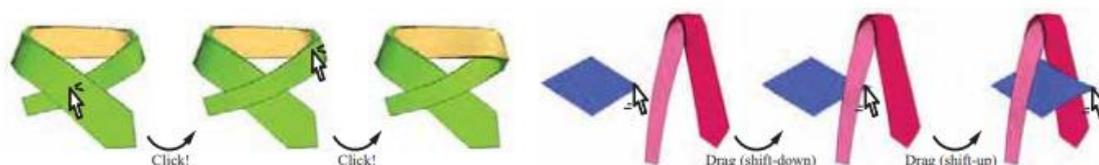


図 1-4^[3] 左：クリックしたポイントの下のローカルレイヤーをスワップ。右：オブジェクトの下をドラッグ(シフトダウン)または上をドラッグ(シフトアップ)。

(4) Stick Figures を用いた人間の動作データの検索と可視化

Choi らは、人のモーションデータの可視化と検索を統合する媒体として、2次元の Stick Figure(線分の集合による図)を用いる提案を行った^[4]。Stick Figure は広い範囲の人の動作を表現することができ、専門的な訓練なしに簡単に描くことができる。ユーザーはデータベースから生成された Stick Figure の図を通して全体的な動きを閲覧でき、また、Stick Figure を描画することで、データベースから目的のモーションデータを検索できる。本研究で提案したユーザーインターフェースを用いて、102 個のモーションファイルを含むデータベースから、目的のモーションセグメントを検索するユーザースタディを行い、提案システムの有用性を確認した。本研究は 2012 年に、Pacific Graphics 2012 において Best Paper Award を受賞した。

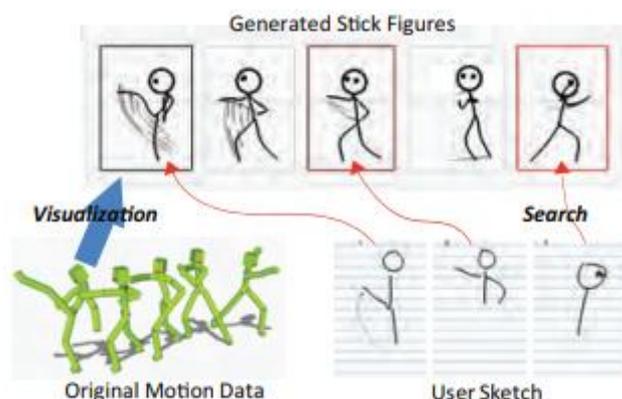


図 1-5^[4] 3次元モーションデータは、2次元の Stick Figure 画像として視覚化される。生成された Stick Figure の図は、スケッチされた Stick Figure 図を入力クエリとして使用して再取得できる。

(5) 3次元アニメーションを階層的に要約する漫画風ストーリーボード生成システム (Dynamic Comics)

2次元アニメーション画像のストーリーボードを生成する一般的な手法は、時系列に沿ってキーフレームを表示するものであるが、それをそのまま3次元アニメーションに適用するのは難しい。3次元アニメーションでは視点を自由に回転することができ、見たい情報によって必要な視点やアニメーションの表示方法(軌跡、ポーズ)が異なるためである。そこで Choi らは、ユーザーがインタラクティブにアニメーションを確認し、漫画風のストーリーボードをデザインすることが可能なシステム「Dynamic Comics」を提案した^[5]。本システムでユーザーは、シーン中のキャラクターとオブジェクトの形とモーションを考慮し、ストーリーボードの各コマを生成する。コマの生成には入力アニメーションから階層的なスナップショットを自動的に生成する新しいアルゴリズムを用いており、元のアニメーションの流れが最適な形で視覚化される。ユーザーは、キャラクターやオブジェクトの動きの複雑さ、アニメーションの流れ、コマの大きさを基に、ストーリーボードをデザインすることができる。このシステムは、大量のアニメーションデータを手早く検索したり

編集したりするのに有効である。

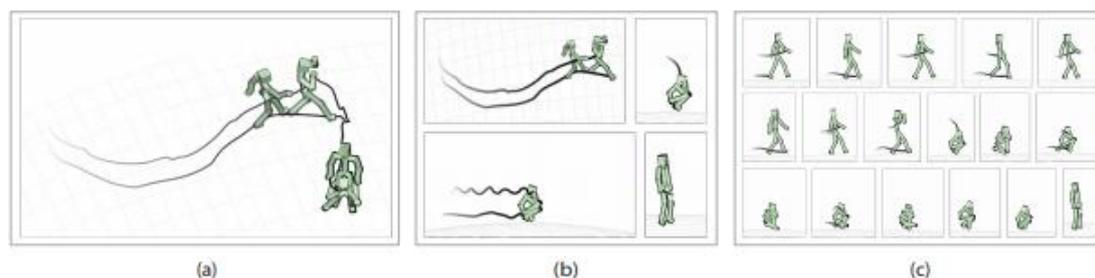


図 1-6^[5] 自動的に生成される3つのコミックシーケンスは、同じ運動アニメーションをさまざまな視点で記述する。(左)被写体の全体的な移動経路、(中)運動様式の変化、(右)詳細なボディポーズとナンバーステップをそれぞれ示す。

(6) ペンとインクのイラストを描くための描画ジェスチャー機能を持つ対話型テキストチャータデザインシステム(Vignette)

Kazi らは、ペンとインクのイラストでテキストチャータ⁹の作成を容易にするインタラクティブなシステム「Vignette」を開発した^[6]。既存のシステムとは異なり、Vignette はイラストレーターのワークフローとスタイルを維持する。ユーザーはテキストチャータの一部を描画し、ジェスチャーを使用して領域を自動的にテキストチャータで塗りつぶすことができる。ステッチングを使用して1次元と2次元合成をサポートしており、また、インタラクティブなリファインメントと編集機能を備え、より高いレベルのテキストチャータコントロールを提供し、アーティストが希望するビジョンを達成するのに役立つ。プロのアーティストによるユーザー調査では、Vignette がイラストレーションのプロセスをより楽しくし、ユーザーが最初から豊かなテキストチャータを数分で作成できることが示された。

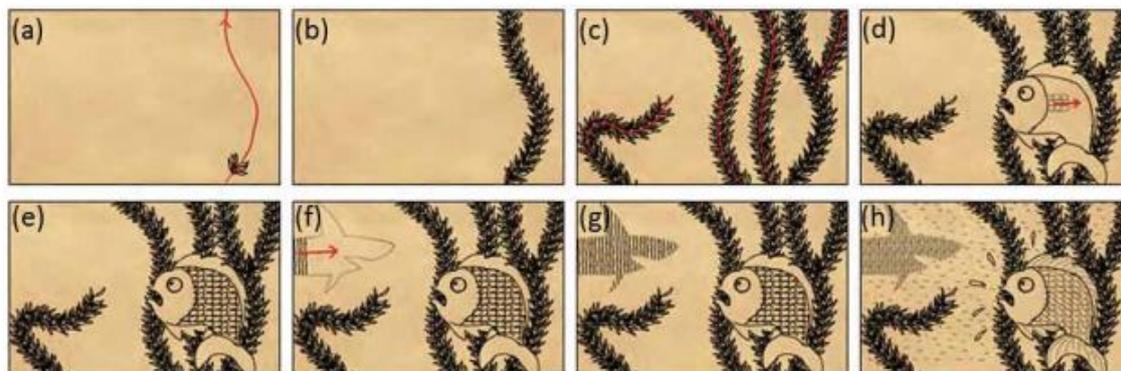


図 1-7^[6] (a)葉のストローク(黒)とジェスチャー(赤)を描く、(b)ジェスチャーとストロークから作成されたテキストチャータ、(c)テキストチャータをより多くする、(d)鱗ストロークとジェスチャーを描く、(e)鱗を付けた領域、(f)陰影ストロークとジェスチャーを描く、(g)陰影を埋める、(h)最終的なイラストは数分で完成。

(7) スケッチによる流体システムの動的イラストレーションの開発

⁹ 3次元オブジェクト表面に貼り付けられる模様。

Zhu らは、複雑な流体システムのインタラクティブなイラストレーションを可能にする軽量スケッチシステムを開発した^[7]。ユーザーは 2.5 次元のキャンバス上にスケッチして、流体回路の形状と接続を設計できる。これらのスケッチは、自動的に解析されて水力学グラフが構成される。その上で、イラストに動きをつけるために、水力学と流体力学を組み合わせ合わせたハイブリッド流体モデルによるシミュレーションがバックグラウンドで実行される。このシステムは、ユーザーが流体システムを段階的に編集するための豊富で簡単な操作を提供し、新しい内部フローパターンをリアルタイムでシミュレートすることができ、医学、生物学、工学の様々な流体システムを説明するための使用が期待される。

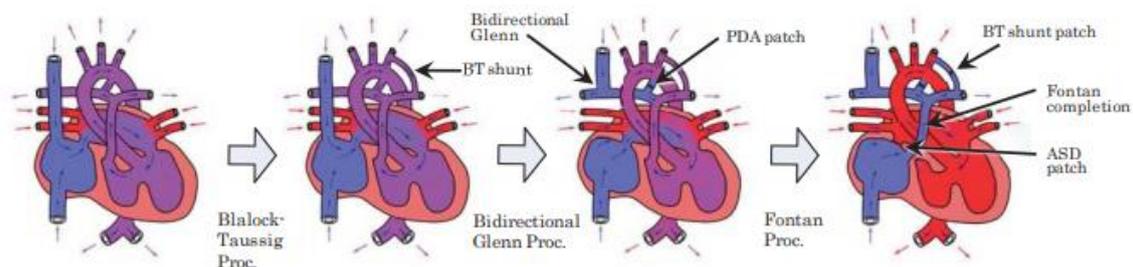


図 1-8^[7] 本手法を用いて作成された三尖弁閉鎖症(TA)の手術のイラストレーション。ユーザーがこれを対話的に編集すると、システムが自動的に流れをシミュレーションする。

(8) テッセレーションに頼らないスムーズなシャドウ境界

Mattausch らは、シャドウキャスティングジオメトリのテッセレーション¹⁰を明らかにしない、スムーズなシャドウ境界をレンダリング¹¹するための効率的で軽量のソリューションを提案した^[8]。そのアルゴリズムは、基礎をなすメッシュの滑らかな輪郭を再構成し、滑らかなシルエットからシャドウボリューム¹²を押し出して影をレンダリングする。この目的のために、基礎となる平滑メッシュの頂点法線を使用して改良されたシルエット再構成を行い、次いで輪郭が十分滑らかになりシャドウ境界を滑らかにするように投影するまで、シルエットループを細分化する。この手法はシャドウの滑らかさをジオメトリのテッセレーションから分離し、複数の LOD(Level Of Detail)¹³に対して同等に高いシャドウ品質を維持するために使用できる。これはシャドウボリュームのよく知られたボトルネックであるフィルレート¹⁴の変化を最小限に抑えるだけなので、オーバーヘッドはわずかであ

¹⁰ テッセレーション (Tessellation) : コンピュータグラフィックスの画像演算手法の 1 つである。2 次元画像上で 3 次元の複雑な立体を表現するために多数のポリゴン (polygon) が用いられるが、テッセレーションはこのポリゴンメッシュをさらに分割して表現することで、画像をより詳細かつ滑らかで現実感のあるものにする技術。

¹¹ データ記述言語やデータ構造で記述された抽象的で高次の情報から、コンピュータのプログラムを用いて画像・映像・音声などを生成することをいう。元となる情報には、物体の形状、物体を捉える視点、物体表面の質感(テクスチャマッピングに関する情報)、光源、シェーディングなどが含まれる。

¹² Shadow volume : 3D のコンピュータグラフィックスにおいてレンダリングされたシーンに影を加える技法。

¹³ LOD : カメラからの距離に応じてモデルのディテールを切り替え、シーンの計算負荷を軽減する方法。

¹⁴ fill rate : テクセル描画速度 《1 秒あたりにテクスチャー割り当て・陰影付けのできる立体表面要素

る。

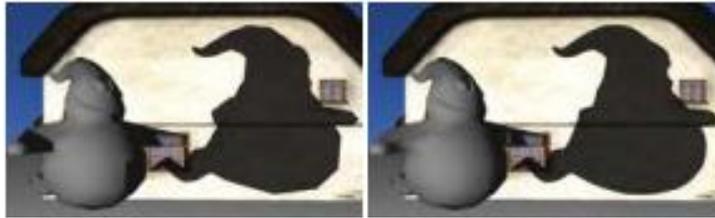


図 1-9^[8] 離散的な影は、影の境界線の不連続による下のメッシュの粗いテッセレーションを示すが(左図)、これは滑らかな輪郭再構成スキームで回避できる(右図)。ゴーストのセルフシャドウも改善されている。

(9) リアルタイム有限要素法によるインタラクティブな幾何学的モデル化

現在のコンピュータ支援エンジニアリングシステムでは、ユーザーをより良いデザインに導くツールとしてではなく、要求された制約を満たさないデザインを拒絶するために、主としてオフラインの検証ツールとして数値シミュレーション方法を使用している。Umetani らは、リアルタイム有限要素法(FEM)解析をインタラクティブな幾何モデルに統合する方法を導入した^[9]。インタラクティブな編集集中に、数値シミュレーションからのリアルタイムフィードバックによって、ユーザーは退屈な試行錯誤の繰り返しなしに改善されたデザインへと誘導される。速度と精度のトレードオフに基づいて、メッシュや行列などの以前の計算結果を慎重に再利用することで、インタラクティブな編集集中の高速のFEM解析が可能になった。このツールは未熟練ユーザーが物理的な制約を満たすオブジェクトをデザインし、基本的な物理的原理を理解することを支援することができると考えられる。

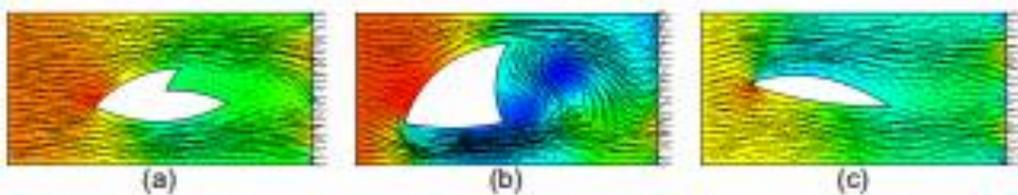


図 1-10^[9] オブジェクトの周りの流体。速度フィールドは線分として表示され、圧力は色の変化で表示される。ユーザーがオブジェクトの形状を変えると、(a) 境界層の分離や (b) カルマン渦の通路など、さまざまな現象が見られる。

(10) ゲーム理論を適用した人とマシンのコミュニケーション(Sketch-Editing Games)

Ribeiro らは、スケッチに注目したグラフィカルベースに基づくインタラクションの不確実性の研究を行った^[10]。問題の包括的なモデルには、インタラクション参加者(および彼らの現在信じていること)と、彼らの可能な行動と過去のスケッチが含まれていなければならないが、後者のすべての要素を考慮して、前者(不確実性)の問題をフレーム化して解決する方法はまだ不明である。ここでは、ゲームとして問題を組立てゲーム理論でそれを解くことを示し、新しい双方向のスケッチに基づくユーザーインタフェースのデザイン用

フレームワークに結びつけた。双方向スケッチゲームは、学習方法と解釈のエラーに対応する方法等の新しいインタフェースで本質的な問題に対処している。自動的なスケッチ-to-コマンド (sketch-to-command)、ハンドジェスチャ認識、メディア・オーサリングおよび視覚探索の可能な適用を調査し、2つの評価を行った。評価は、プレイヤーが繰り返されたプレーによるパフォーマンスおよび学習上のインタラクション状況の影響をどのように改善するか実証した。

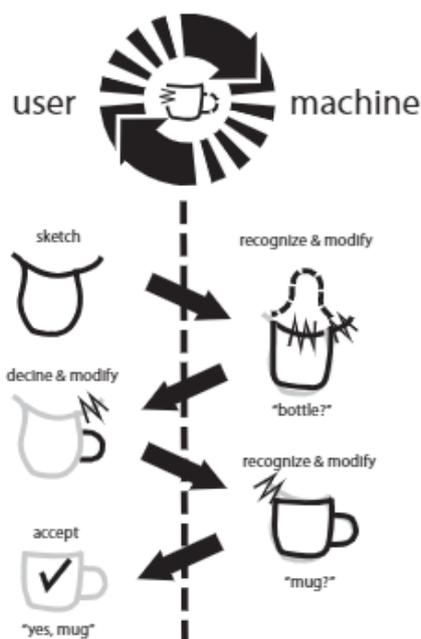


図 1-11^[10] 双方向のスケッチに基づいたユーザーインタフェースのデザイン用のフレームワーク

1.5.2 生活デザイングループの研究

生活デザイングループは、実世界において日常で使用する道具や生活用品を自らデザインできるようにすることを目指した。「形状設計支援ツールの基礎開発の研究」では、実際の世界に存在する事物のデザインのため、重さ、慣性、柔軟性、大きさといった実体の持つ制約を「物理シミュレーション」に取り込み、「モデリング中」に実時間でシミュレーションする研究を行った。「形状設計支援ツールのアプリケーションの研究」では、デザイン作業を支援することに特化した必要最低限のシミュレーションに焦点をあわせ、これまで不可能とされていたデザインの実現を目指した。

(1) 実空間での身体の動きを、3次元スケッチとして読み込む3Dスケッチアプリケーションの開発 (Spatial Sketch)

Willisらは、実空間での身体の動きを、計算機内に構築する3次元形状を3次元スケッチとして読み込むインタフェースを持つ3Dスケッチアプリケーション「Spatial Sketch」を開発した^[11]。身体の動きを3Dのスケッチとして読み込み、その3Dスケッチを工業製品

のデザインに活用する試みで、実空間の動きと物の製作の間に橋を架ける 3D スケッチアプリケーションである。このアプリケーションは、デジタル製作としての具体化により、コンピュータと人との相互作用の関連性に影響を及ぼすものである。



図 1-12^[11] Spatial Sketch を使ったランプシェードの作成。(A)元の 3D スケッチ、(B)スケッチをラジアルにスライス、(C)レーザーカットしたカードのスライス、(D)組み立て前の最終パーツセット、(E)組み立てられたランプシェード

(2) 実制作のための家具形状モデルの構造推定手法

Lau らは、CG 用に作られた家具の 3 次元形状データに対し、実際に製作する際に必要となるモデルから実際に製作するための部品や取付け金具を自動生成し、家具の部材の組み合わせ構造を表現する形式文法と構造推定手法を開発した^[12]。提案手法では、キャビネットやテーブルなどの基本的な家具の構造を表現するための形式文法をあらかじめ定義し、それを構造解析に使用した。この形式文法によって生成される有向グラフ¹⁵は一つの家具モデルを表し、各々のノードは部品、エッジは部品の結合を表し、これらの情報は、各部品の接続関係や、釘や蝶番などの取り付け金具の位置および数を特定するとき利用される。

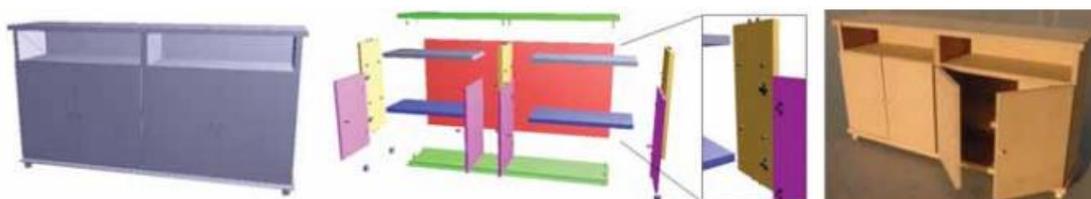


図 1-13^[12] (左)IKEA ALVE キャビネットの任意の 3 次元モデル、(中)本システムで作成された組み立て可能な部品とコネクタ、(右)作成された部品とコネクタの構造と寸法をベースに実際のキャビネットが作られた。

(3) 2 次元パターンの生成とドレープのオンラインシミュレーション(Sensitive Couture)

Umetani らは、2 次元パターンの生成と 3 次元の高忠実度模擬ドレープフォームとの間の

¹⁵ グラフ理論で、つながり方だけではなくどちらからどちらにつながっているか示すために、エッジに矢印をつけたグラフ。

双方向設計と編集機能を提供する、インタラクティブな衣服デザインツール「Sensitive Couture」(SC)を開発した^[13]。SCは連続したインタラクティブで自然なデザインモダリティを提供し、2次元デザインと3次元ドレープフォームが同等のステータスを受け取り、同時に表示され、対応をシームレスに維持する。アーティストは2次元パターンデザインをインタラクティブに編集し、これらの変更が3次元フォームにどのように影響するかを安定した正確なフィードバックとしてオンラインですぐに得ることができ、迅速なプロトタイプリングと複雑なドレープフォームの直感的な理解を可能にする。



図 1-14A^[13] 2次元衣服パターン(上)とそれに対応する3次元ドレープ(下)の両方を同時に同期してモデリングおよび編集するためのツールSCによって、時代を超越したこの問題は解決される。

原則としてSCは他の多くのフレキシブルな素材にも拡張でき、室内装飾、アルミニウム彫刻、またはこれらの紙彫刻のデザインが可能になる。

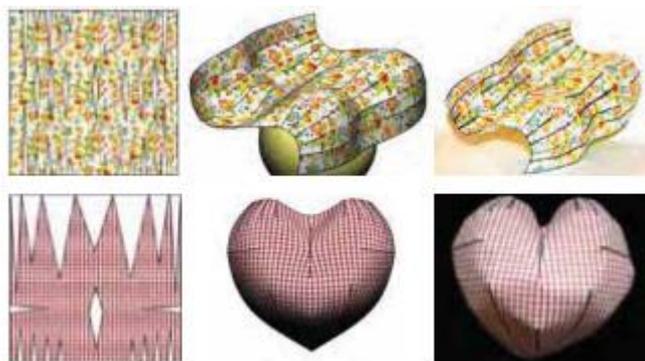


図 1-14B^[13] (左から右): アーティストが制作したダーツの2次元パターン、対応する3次元ペーパーシミュレーション、作成したペーパークラフトオブジェクト。

(4) マネキンを使ったドレスデザインのための3次元インタフェース (DressUp)

Wibowoらは、人型のマネキンを用いた3次元入力手法でドレスをデザインするためのインタフェース「DressUp」を開発した^[14]。このシステムは等身大サイズの物理的なマネキン、ディスプレイ、およびマネキン上あるいはマネキン周囲の3次元を描画するためのツールから構成される。ユーザーが3次元空間上を描画によってデジタル布の断片を作成あるいは修正すると、ディスプレイ上のマネキンのモデルに表示される。この手法を用いて

様々な服を作成することができるかについて調査を行った結果、等身大サイズの物理的なマネキンをガイドとして活用することで、ユーザーが本インタフェースを用いて服を柔軟にデザインすることができることを確認した。



図 1-15^[14] システムの概要
 (左) ユーザーとマネキンとディスプレイ、(中) ドレスのモデル、(右) ドレス

(5) シェルシミュレーションを統合した薄膜バルーンデザインシステム

Furuta らは、スケッチインタフェースと物理シミュレーションを組み合わせ、アルミ薄膜を利用した風船のような、伸縮性をほとんど持たない膜状の素材から立体的な形を作るためのシステムを提案した^[15]。目的とする3次元の形状を実現するための、2次元の型紙を本システムによって自動生成する。本研究では形状設計システムに DKT(Discrete Kirchhoff Triangle)シェル要素¹⁶に基づく有限要素法の物理シミュレーションを組み込み、完成形状の輪郭線の入力と、表面のテクスチャーの入力をペイントインタフェースで対話的に行えるようにした。

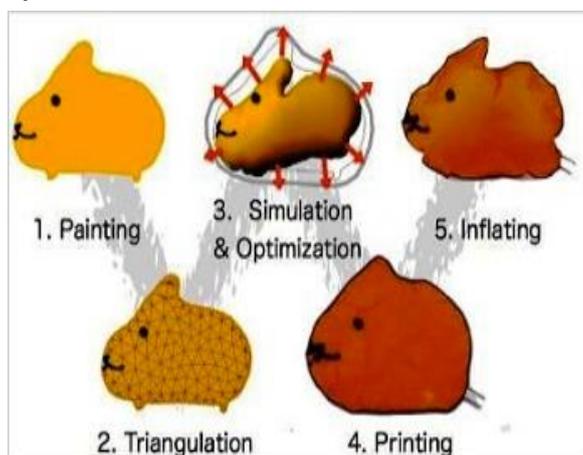


図 1-16¹⁷ 膨張したバルーンのシルエット画像をスクリーン上に描き、それからシルエットの閉ループが抽出される。システムはそれを三角測量し FEM¹⁸解析により、パターンから膨張した

¹⁶ DKT(Discrete Kirchhoff Triangle): 離散的なキルヒホッフの三角形は、有限要素法で薄板 3 角形要素の中で広く使われる要素である。シェル要素は、見た目は厚みゼロの面だけの要素で、計算上は板厚分の剛性を持った要素のこと。

¹⁷ <https://www.jst.go.jp/erato/igarashi/en/projects/balloon/index.html> より引用した。

¹⁸ 有限要素法

3次元形状を生成する。膨張した3次元形状のシルエットと描画された画像とが比較される、それらの違いに応じてパターンが変更される。最終的なパターンが生成されると、吸気量の表示が表示される。

(6) 写真の上に新規オブジェクトのアウトラインを直接スケッチして、実世界のオブジェクトを設計するシステムの開発 (Modeling-in-Context)

Lau らは、エンドユーザーが自分自身のオブジェクトを設計する全過程に参加できるフレームワークを、初期概念の段階から既存のオブジェクトを補足して新しい実世界オブジェクトの製作までを行うシステム「Modeling-in-Context」を提案した^[16]。ユーザーは新しいオブジェクトをデザインするのに、大まかなガイドとして1枚の写真を使い、システムは新しいオブジェクトのアウトラインを直接写真にスケッチして、幾何学上の特性を説明する2次元インタフェースを提供する。3次元形状の生成には、改良型リップソン最適化手法¹⁹を導入した。写真の既存オブジェクトのサイズを立体的に計測して、そのオブジェクトやスペースに合わせてさまざまな実世界のオブジェクトを設計できる。本研究は2010年に、Eurographics Symposium on SBIM (Sketch-Based Interfaces and Modeling) 2010において Best SBIM Paper Award を受賞した。

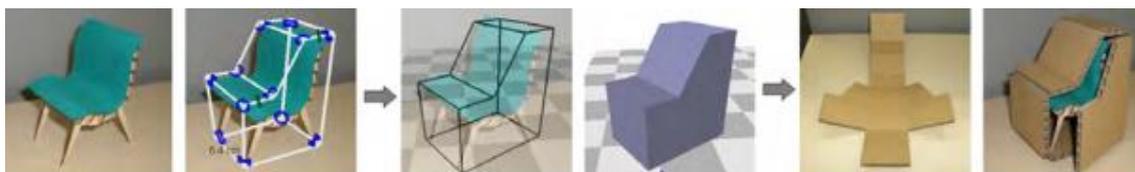


図 1-17^[16] 椅子にフィットする段ボール収納箱：左から、元の写真、2次元スケッチを施した写真、(次の2枚) 3次元仮想モデル、(次の2枚) 作成された実世界のオブジェクト。

(7) 形状設計と実時間固有値解析を統合し、鉄琴を叩いた時に出る音を確認しながら自由な鉄琴形状をデザインするシステムの開発 (Metallophone)

Umetani らは、1.5.1 項で述べた「リアルタイム有限要素法によるインタラクティブな幾何学的モデル化」による形状設計と実時間固有値解析を統合する手法を用いて、鉄琴を叩いた時に出る音を確認しながら自由な鉄琴形状をデザインするシステム「Metallophone」を開発した^[17]。鉄琴が正しい音を発するためには、鉄琴の板の形が正しくデザインされていなければならないが、形状と音の関係は自明ではないため、自由な形状の鉄琴を新たにデザインすることは普通のユーザーにとっては困難である。本システムでは、ユーザーのドラッグ操作による形状変形の最中に、システムがその形の鉄琴を叩いたときに鳴るはずの音を連続的にユーザーに提示することにより、自由な形状でかつ正しい音のなる鉄琴をデザインできるようにした。本研究は2010年に、日本ソフトウェア科学会18回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2010) においてベストペ

¹⁹ リップソン最適化手法は、以下の論文で発表された。LIPSON H., SHPITALNI M., "Optimization-based reconstruction of a 3d object from a single freehand line drawing". Computer-Aided Design, 28(8), 651-663 (1996)

ーパー賞を受賞した。



図 1-18^[17] 魚の形にカスタムデザインされた鉄琴

(8) 形状設計と剛体物理シミュレーションを統合内蔵した、キネティックアートデザインシステムの開発 (Kinetic Art)

モビール彫刻やバランス玩具などのキネティックアートは、動きを伴うアートである。結果を予測するために物理学を考慮しなければならないため、オリジナルのキネティックアートのデザインは困難である。現在の CAD (Computer-Aided Design)²⁰ や CAE (Computer-Aided Engineering)²¹ ツールは、一般にこれらのシステムが完全に分離されているため、そのような動的オブジェクトを設計する際にはほとんど使用に耐えない。Furutaらは、3次元幾何学的モデリングインタフェースと剛体物理シミュレーションを組み合わせた、オリジナルのキネティックアートオブジェクトを設計するための新しいシステム「Kinetic Art」を提案した^[18]。このシステムでは、時間経過に伴って変化する物体の位置や動きを高速にかつユーザーにわかりやすく提示するために、シミュレーション精度の動的な調整や軌跡や回転を表すアニメーション表示などの工夫を行った。本システムを用いることで、従来は試行錯誤が必要であったキネティックアート作品の設計が容易に行えることを示した。本研究は 2009 年に、NICOGRAPH 2009 春において最優秀ポスター賞を受賞した。

²⁰ CAD (Computer-Aided Design) : コンピュータを用いて設計をすること、あるいはコンピュータによる設計支援ツール。

²¹ CAE (Computer-Aided Engineering) : コンピュータ技術を活用して製品の設計、製造や工程設計の事前検討の支援を行うこと、またはそれを行うツール。

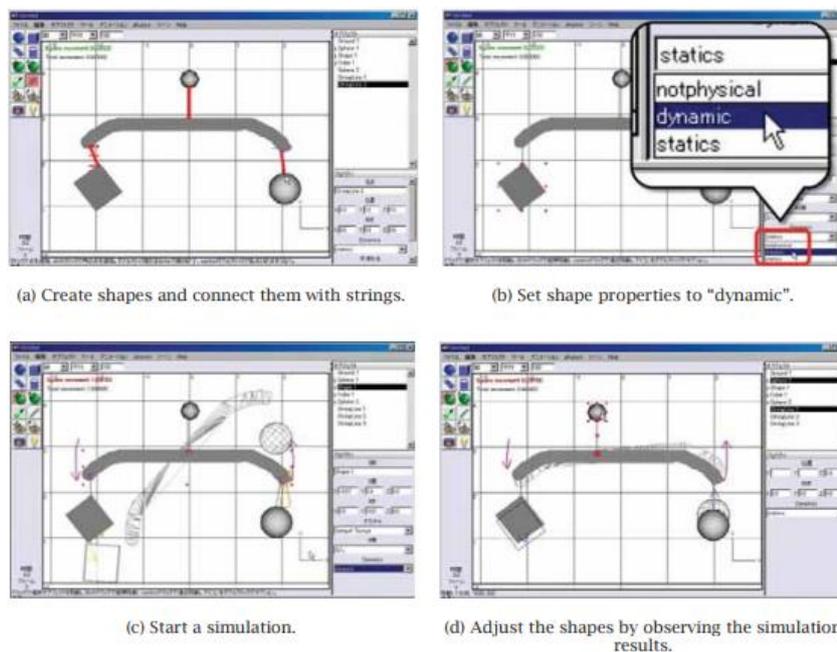


図 1-19^[18] キネティックアートの作成の流れ

(9) 物理的条件を満足するインタラクティブな家具の設計 (Guided Exploration)

図形の幾何学的なモデリングと物理的な有効性は伝統的に独立して考えられており、美しく魅力的でかつ物理的に正しいモデルの作成は挑戦的な課題である。Umetani らは、幾何学および物理的に有効な形状を、効率的かつ直感的に探査できるインタラクティブな設計フレームワーク「Guided Exploration」を提案した^[19]。このシステムでは、幾何学的な編集を行う際には編集されているパラメータの有効範囲が継続的に可視化され、編集操作時に制約が満たされなかった場合には、有効性を復元するために離散的及び連続的どちらの変更も伴った複数の候補を生成する。ユーザーが美しくデザインすることに目を向けている際にこれらの動的なガイダンスを提供することで、物理的な有効性を満たしたデザインの手助けをすることができる。

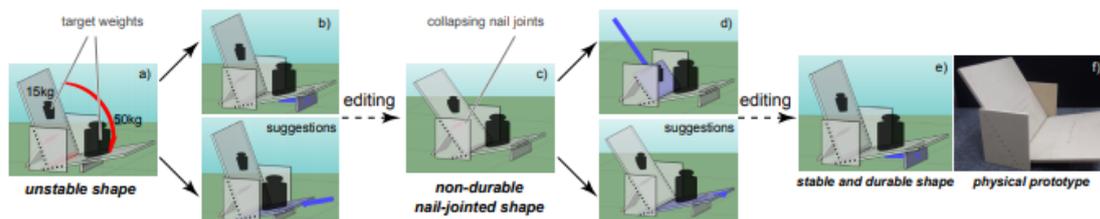


図 1-20^[19] モデル不安定性(すなわち転倒)または非耐久性(すなわちジョイントにかかる過剰な力)によって物理的に無効なデザイン(a)から出発して、物理的妥当性を回復するためのデザイン提案(b, d)を行う。この提案は形状空間探求のガイドを提供するので、ユーザーは目標の耐荷重および実用的な材料仕様(e, f)の下で、有効な釘接合家具設計を迅速に実現することができる。

(10) 自由形状で自由飛行モデルの手投げ飛行機のインタラクティブなデザインと最適化 (Pteromys)

Umetani らは、実際に飛行できるオリジナルの手投げ飛行グライダーをデザインするためのインタラクティブな手法「Pteromys」を提案した^[20]。グライダーの空力特性は形状に依存しておりデザイン上の制約を課する。そこで、ビデオカメラで取得したグライダーの飛行軌道から翼にかかる力と翼の形状の非線形関係を機械学習するシステムを提案した。このシステムは風洞を建設するよりも簡単であるが、それを使って簡単なグライダーの翼モデルを効率的に発見することができた。結果として得られたモデルは、一般的な自由形状の翼を扱うことができ、取得した飛行機の飛行軌道と十分によく一致する。このコンパクトな空力モデルを基に、ユーザーが作成する翼形状に対して、最大限の飛行能力を得ることができるようにインタラクティブに最適化する飛行機設計ツールを提供した。本研究は2014年に、経済産業省 Innovative Technologies に選出された。

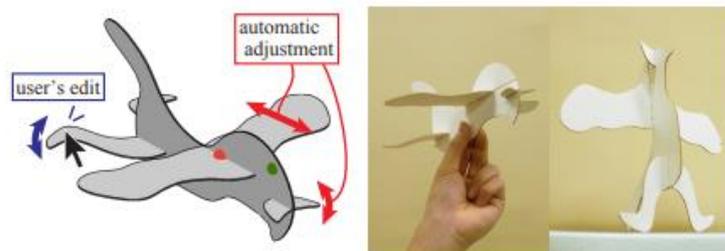


図 1-21^[20] (左)このモデルの飛行機設計ツールは、グライダーの空力特性を解析し、ユーザーがインタラクティブに飛行機を設計しながら最適化する。(右)ユーザーの作例。

(11) しなやかに曲がる薄いシートの折り方をデザインできる形状設計手法 (Soft Folding)

Zhu らは、しなやかに曲げることが可能な紙や布のような薄いシートの折り方を、インタラクティブにデザインするための形状設計手法「Soft Folding」を提案した^[21]。ユーザーが2次元展開図上の曲線で示された折れ線に対して、折れ線の影響範囲と折り方の柔らかさを指定すると、指定された制約を基にシステムが全体の折り方をシミュレーションし、折られた後の3次元形状を提示する。これにより従来の折り図によるステップ毎の折り方ではデザインすることができないしなやかに曲げられた形状をデザインすることができる。また、近似結果に対して非線形の物理シミュレーションを適用することで、より実物に近い形状を得ることも可能である。本システムを用いて実際に作品をデザインし、折り方の柔らかさを調整可能にすることが複雑な形状をデザインするのに有効であることを確認した。本研究は2013年に、The 21th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2013)において Best Paper Award を受賞した。



図 1-22^[21] Soft Folding によってモデル化された薄板フォーム。左から右：革シート、革製のペンホルダー、靴に適用された Water-bomb 折り紙の模様。(サブ図形で対応する折り目と縫い模様を視覚化する。折り線の色と太さはその倍率とシャープネスを示す。継ぎ目は境界に太い曲線のペアとして表示される。)

(12) 数値最適化による平坦折りたたみが可能な折り紙のための折り目パターンの設計手法

折り紙が幾何学的な問題として研究されるとき、折り紙が平らに折りたたまれていると仮定されることが多い。この平坦折りたたみ性は、産業製品の可搬性と保管スペースを増やすために折り紙の技術を適用する際に重要な特性である。Mitani は、数値最適化アルゴリズムを搭載したコンピュータを用いて、平坦折りたたみ可能な新しい折り目パターンを生成する方法を提案した^[22]。数値最適化が収束しないことがあり、最初の手順に戻らなければならない場合があるが、無作為に配置された頂点を含む多くの平坦に折りたためる折り目パターンを生成できる。この方法は、新しい折り紙デザインとしてだけでなく、折り紙パズル「Fold Me Up」²²の問題としても使用できるパターンを生成することができる。

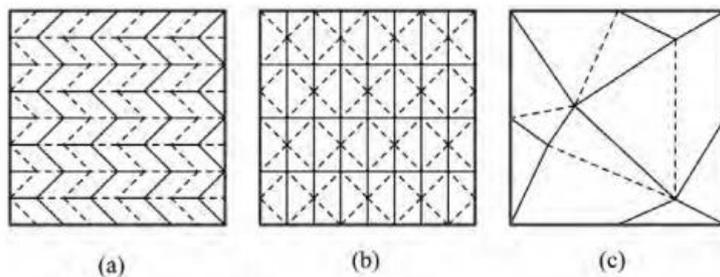


図 1-23^[22] (a)三浦折りパターン、(b)Waterbomb パターン、(c)本法のランダム点から作成されたパターン

(13) スケッチインタフェースで椅子の形状を設計し、その形状に対する仮想空間での座り心地の検証と、組み立てのための部品図の出力を行うシステムの開発 (SketchChair)

Saul らは、初心者のユーザーが自分の椅子の設計と構築のプロセス全体を制御できるようにするアプリケーション「SketchChair」の開発を行った^[23]。ユーザーが画面にデザインしたい椅子の輪郭をスケッチすると、自動的に3次元の椅子が生成される。生成された椅子については、仮想的に人間を座らせることで座り心地やバランスを試すことができる。また、自動的に平面の板の型からなる設計図が生成され、その設計図にしたがってレーザーカッターにより板を切断して組み立てることで、実物の椅子を製作することができる。

²² <http://michelletaute.com/book/fold-me-up/>

一般向けの椅子デザインワークショップを開催し、椅子をデザインした経験のない素人のユーザーでも簡単に椅子をデザインできることを確認した。

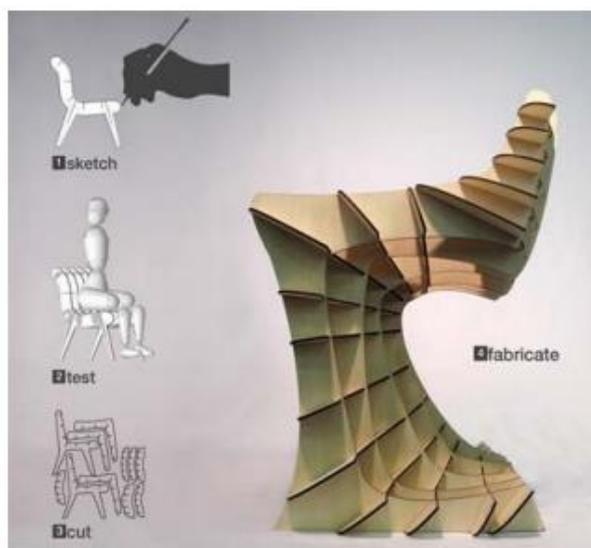


図 1-24^[23] 本システムによる椅子製作の流れ

(14) 仮想現実感環境における形状スタンプによるモデリング (Situating Modeling)

3次元入力装置を用いて何もない空間でスケッチすることによって、3次元モデリングを行う方法がいろいろと提案されているが、既存のシステムでは正確な形状入力が難しく、触覚フィードバックが存在しないという問題がある。Lauらは、仮想現実感環境における形状スタンプによるモデリングシステム「Situating Modeling」を開発した^[24]。これはユーザーが具体的な実体のある3次元プリミティブを空間に配置していくことにより3次元モデリングを行うインタフェースで、板片や円柱といったスタンプのそれぞれの形状は、作成しているモデルを構成する部材の一部を表している。本手法によりユーザーは実空間に存在する物体を直接参照しながら、実物大の3次元オブジェクトを作成することができる。さらに、両手による形状スタンプ技法を用い、すでに作成したモデルとの間の触覚フィードバックを実現した。ユーザーはオブジェクトを仮想的に見ることができるが、実際には接続された形状をどこにスタンプするかを知るための物理的な参照はないので、この触覚フィードバックによって空の3D空間でスタンプがなくなった。本研究は2012年に、ACM international conference on Intelligent User Interfaces 2012において Best Paper Awardを受賞した。

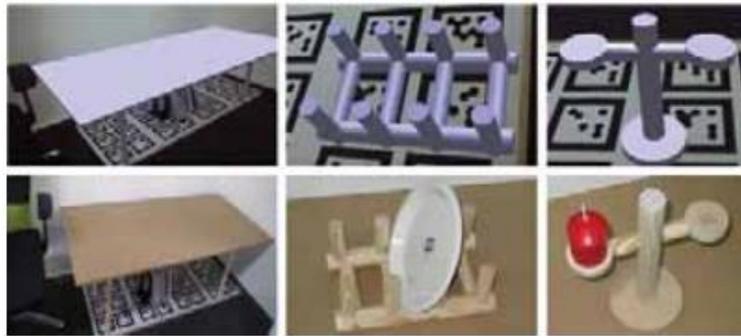


図 1-25^[24] 本システムで作成された仮想モデルと制作された物体。左から、テーブル、ディッシュホルダー、キャンドルホルダー

1.5.3 ロボット行動デザイングループの研究

ロボット行動デザイングループでは、今後家庭に入ってくると予想されるロボットに対して、一般のユーザーが行動を指示するための方法について研究した。「個別動作を指示するためのインタフェースの研究」では、ユーザーへの負担が少なく操作が容易な方式の開発を進め、例えば、画像の上にユーザーが操作の書き込みを行う画像ベースやスケッチベースのインタフェースの開発等、視覚的で直接的な方法で行動を指示する研究を行った。「より複雑な動作を教示するための研究」では、ロボットと人間との間で情報をやり取りするための方法、具体的には、画像などのセンサー入力から複雑な実世界の状況を判断し、それをもとにアクチュエータの出力を生成して実世界の行動を生成するといった従来のプログラミングと異なる、新しいプログラミングパラダイムの開発を検討した。

(1) ユーザーの非明示的なロボット操作を実現するためのカードインタフェースを用いた方式の開発(Magic Cards)

典型的なヒューマンロボットインタラクション(HRI)は、ユーザーがロボットと明示的に対話することを前提としている。しかし、ロボットによる明示的な制御は、例えば家事を扱うなどのケースでは不必要または望ましくないことさえあり得る。Zhaoらは、これらとは異なる新たなロボットとのインタラクション手法の選択肢の一つとして、紙のカードを利用したインタフェース「Magic Cards」を提案した^[25]。本手法は、ユーザーがロボットに対する指示が書かれた紙のカードを、作業を行ってほしい場所に置いておくと、ユーザーがいなくてもロボットが作業を行ってくれるというものである。実装したプロトタイプシステムは、天井につるした4台のカメラと、ロボットおよびPCから構成されている。ユーザー調査では、紙カードベースのインタフェースの使いやすさが高い評価を得た。

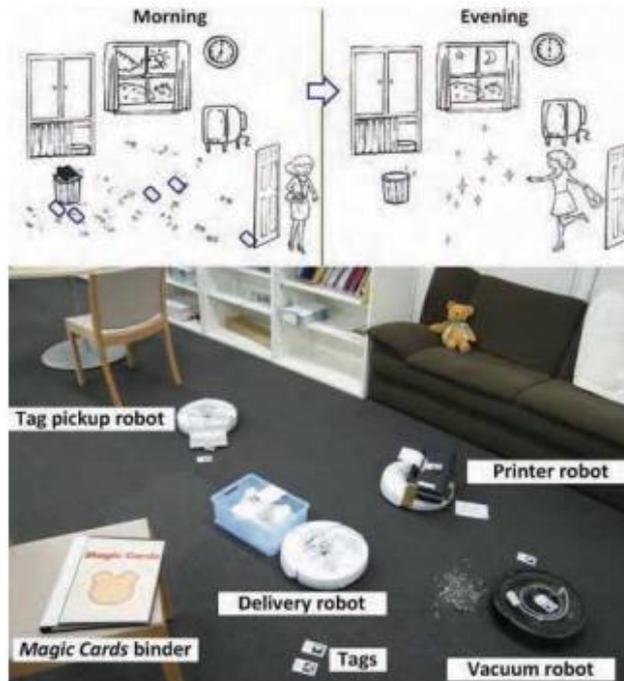


図 1-26^[25] (上)Magic Cards インタフェースを用いる本システムのユーザーが描くシナリオ、
(下)家庭環境で様々なロボットによる本システムの実装状況。

(2) タッチパネルのモニター画面でペンストロークによりロボットを操作する方式の提案 (Sketch and Run)

Sakamoto らは、タッチパネルのモニター画面上でのストロークジェスチャーを用いて家庭用ロボットに動作指示を簡単かつ直感的に行うことのできるインタフェース「Sketch and Run」を提案した^[26]。このインタフェースにより、天井カメラからのトップダウンビューでロボットの動作や動作をスケッチすることで、ロボットを制御したり動作を設計したりすることが可能になる。本研究では家庭用ロボットに特有のハウスクリーニング作業に焦点を当て、掃除ロボットの行動を設計するためのスケッチインタフェースを開発した。



図 1-27^[26] スケッチインタフェースを備えたホームロボットの制御:ユーザーがタブレット上でロボットの動きをスケッチすると、ロボットは部屋のスケッチされた動きに沿って進む。

(3) レーザーポインタのレーザー軌跡によるストロークジェスチャーの認識を用いてロボットに指示する方式の提案 (Laser Gestures)

レーザーポインタは、ロボット制御のための強力なツールとなり得る。しかし、これまでロボット工学の分野での用途は、多目的な入力装置としての可能性を探ることなく、単純なターゲット指定に限られていた。Ishii らは、ストロークジェスチャー認識をレーザーの軌道に適用することにより、ロボットに対象物の選択、タスクの内容、対象物の位置など、様々な指示を与えるためのレーザーポインタベースのユーザーインターフェース「Laser Gestures」を開発した^[27]。このインターフェースを介して、ユーザーはレーザーポインタを用いてストロークジェスチャーを描き、ロボットがそれに応じて実行する目標オブジェクトおよびコマンドを指定することができる。



図 1-28^[27] Laser Gestures を使ったロボットのコントロール

(4) CG 重畳表示を使ってロボットを操作する方法の提案 (TouchMe)

ロボットの操作デバイスとして、ジョイスティックやゲームパッドが広く受け入れられているが、これらのデバイスはボタンとロボットの動きの対応関係が直感的でないため、初心者が自由自在に操作を行うのは難しい。この問題を解決するため、橋本らは CG 重畳表示を用いたロボットの遠隔操作インターフェース「TouchMe」を提案した^[28]。操作対象の作業空間を三人称視点で捉えたカメラ映像がタッチスクリーン上に映し出され、ユーザーはロボットの操作したい部位に直接指を触れることによってロボットを操作することができる。本研究は 2011 年に、The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proceedings of ICAT2011 において、Best Paper に選ばれた。

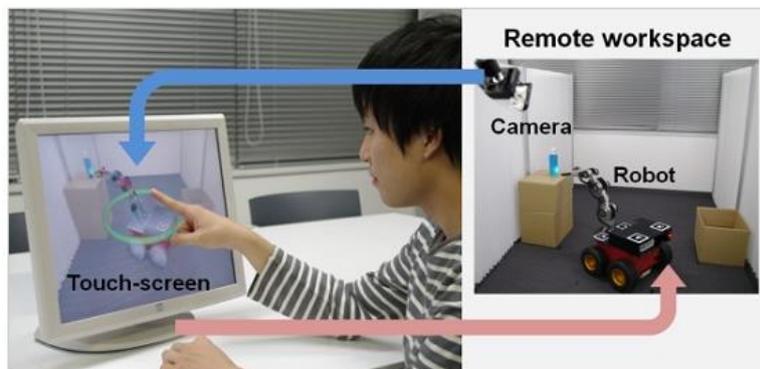


図 1-29^[28] ユーザーはカメライメージをタッチすることで、ロボットの可動部を直接コントロールできる。

(5) ロボットの継続的なパフォーマンスのためのビジュアル言語の提案 (RoboJockey)

Shirokura らは、ロボットの継続的なパフォーマンスのためのビジュアル言語を提案し、ロボットを扱ったことがないエンドユーザーであっても、音楽に同期したロボットのダンス作成を簡単に行うことができるインタフェース「RoboJockey」を開発した^[29]。本インタフェースを用いることにより、ロボットの動きを作るユーザーとそれを鑑賞するユーザーという垣根をなくし、誰もがロボットの動きのデザインに参加できるという新しいエンタテインメント体験を実現できる。ロボットの動作作成には開発したビジュアル言語を用い、作成された動作（プログラム）はロボット上で即座に反映される。ユーザーは継続的に動作作成を行うことができ、また複数のロボットの動作も同時に作成することができる。これらの機能を通して、本インタフェースはユーザーに、音を自由に操るディスクジョッキーのように、ロボットを自由に操る“Robot Jockey”になったような感覚を与えることができる。本研究は 2010 年に、International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2010 において Silver Award を受賞した。



図 1-30²³ (左)マルチタッチディスプレイ上のユーザーインタフェース、(中央)ヒューマロイドロボット、(右)ビジュアルプログラムの例

(6) デモンストレーションによるロボットの対話的動作のデザイン (Style-by-demonstration)

Young らは、人間が手本を示すことによって対話型ロボットの振る舞いをデザインする、スタイル・バイ・デモンストレーション (SBD: Style-by-demonstration) というアプローチを提唱し、その基礎技術や応用例について研究を行った^[30]。手本をしめすことによってロボットの（インタラクティブでない）動きをデザインする通常のプログラミング・バイ・デモンストレーションの手法と異なり、入力として人間のダイナミックな動作を受け取り、それにインタラクティブに反応する動きをデザインする点に本手法の新規性がある。具体的なアプリケーションとして、ぬいぐるみロボットにインタラクティブにダンスを教える“Puppet Dancer”、ルンバのようなロボットにインタラクティブな移動スタイルを教える“Robotic Puppet Master”、ユーザーの操作するアバターの動きに反応して動くキャラクターの動きをデザインする“Animation Puppet Master”などを開発した。本研究は 2012 年に、International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI2012), Lisbon, Portugal

²³ Yoshida, S., et al., “RoboJockey: Robotic Dance Entertainment for All”, *The 5th SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques in Asia (Siggraph Asia 2012)*, *Emerging Technologies*, Singapore, Nov. 28 - Dec. 1 (2012) より引用した。

において Best Paper Award を受賞した。

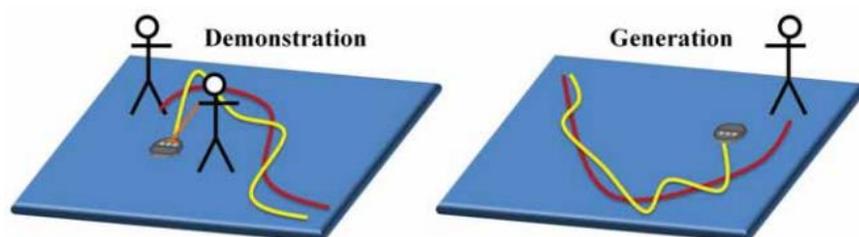


図 1-31²⁴ (左)デモンストレーション：主人が通常どおりに歩き回り、デザイナーがロボット (iRobot Roomba) を箒でプッシュして、ロボットが主人に従わなければならないスタイルを実演する。(右)生成：主人が普通に歩くと、ロボットのパスとスタイルがリアルタイムで自動的に生成され、デモンストレーションスタイルに一致するように反応する。

(7) 料理手順指示のインタフェースと料理ロボットの開発 (Cooky)

Sugiura らは、家庭におけるロボットへの柔軟な動作指示、および作業順序の指示インタフェースと、これを実行するロボットを含めたシステム「Cooky」の提案を行なった^[31]。本インタフェースではユーザーは火力や食材を入れるタイミング、さらに鍋をかき混ぜるタイミング、調味料を入れるタイミングを指示することができる。また、実際の料理作業を行うために、それぞれが役割を持った複数台のロボットを用意し、ユーザーからの指示をもとにして実際に料理作業を行う。このインタフェースの実装を行い、動作指示によってロボットが調理を行い実際にシステムが動作することを確認した。

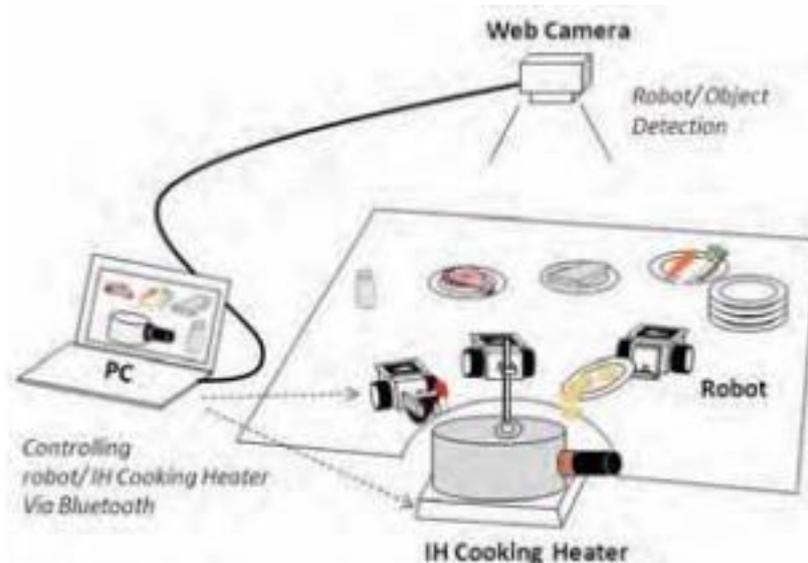


図 1-32^[31] システムの概要

²⁴ Young, J.E., et al., "Showing Robots how to follow People using a Broomstick Interface", 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2010), Late-Breaking Report pp. 133-134, poster, Mar. (2010)より引用した。

(8) テーブルに埋め込んだディスプレイとタッチ入力インタフェースを用いた家電操作インタフェースシステムの提案 (CRISTAL)

CRISTAL (Control of Remotely Interfaced Systems using Touch-based Actions in Living spaces) は、テーブル内に埋め込まれたディスプレイとタッチ入力インタフェースを用いた家電操作インタフェースである。本インタフェースではシステム内に保存された DVD や写真などのコンテンツをテレビやデジタルフォトフレームなどにテーブルトップインタフェース上でドラッグ・アンド・ドロップすることで、コンテンツの再生などができる直感的な操作をユーザーに提供する。テーブルトップインタフェース上では保存されたコンテンツのプレビューや、DVD の再生、早送り、巻き戻しを直感的に行うことができる。さらに、部屋の中に設置された照明やスピーカなどをテーブルトップインタフェース上で直接触ることで操作をすることができる。このプロジェクトは Upper Austria University of Applied Science の Media Interaction 研究室との共同研究プロジェクトであり、当研究グループは実世界コントロールの部分を担当した。具体的には、Seifried らが「Sketch and Run」インタフェース²⁵を CRISTAL へ応用し、システムから家庭用掃除ロボットのコントロールを可能にした^[32]。本研究は 2009 年に、SIGGRAPH 2009 において Best of Engineering Technologies Award を、2010 年には Laval Virtual 2010 において Grand Prix du Jury Award を受賞した。



図 1-33^[32] CRISTAL で家電を操作

(9) 扇風機の人単位の風の強さ、風の方向、動作のオン・オフ等を制御する方法の提案 (AirSketcher)

現代の空調システムには、温度設定が部屋単位であることや人間の室温の感じ方の差など課題がある。その解決手法として渡邊らは、インタラクションの観点から使いやすい風をつくりだす「AirSketcher」を提案した^[33]。「AirSketcher」は直接的で多様な風を容易につくりだすことができる扇風機システムである。扇風機にインタラクティブ性を持たせ、ユーザーが意図通り風を操作可能になることで空調に対する不満を解決できる。本研究で

²⁵ Sketch and Run の詳細は本報告書の 1.5.3 (2) タッチパネルのモニター画面でペンストロークによりロボットを操作する方式の提案に記載。

は風を制御するインタラクション手法として、風を操るかのようなメタファで風を制御する AirWand、風を描くメタファを用いて風を制御する AirCanvas、風を受け入れるか否かをカードによって指示する AirFlag の 3 つを考案し試作した。本研究は 2011 年に、日本デザイン振興会・「2011 年度グッドデザイン：デザインにおける研究開発」部門においてグッドデザイン賞を受賞した。

3つの操作手法で風を操る



図 1-34²⁶ 3つのインタラクティブな風の制御

(10) デジタルレシピの調味料や材料の量と連動して動作する、計らなくても済むスプーンの提案 (smoon)

Watanabe らは、デジタルレシピの調味料や材料の量と連動して動作する、ユーザーに計量を意識させないで調理を可能にするシステム「smoon」を提案した^[34]。smoon は物理的に変形するロボット型計量スプーンである。レシピデータと連動し、計量すべき量の形にスプーンが変形することで、ユーザーはただ材料を掬うだけで適切な量を計量できる。smoon によってユーザーはレシピにある複数の表記に注意を払う必要がなく、また計量行為をすることなく調理を進めることができる。本研究は 2011 年に、情報処理学会インタラクション 2011 においてインタラクティブ発表賞、また、Mashup Awards 7 において優秀賞を受賞した。



図 1-35²⁷ ロボット型計量スプーン「smoon」

(11) ペインティングインタフェースを用いたロボティック照明の制御 (Lighty)

橋本らは、ユーザーがコンピュータ制御照明の配列を使用して実際の部屋の輝度分布を設計することを可能にする、ペインティングインタフェース「Lighty」を提案した^[35]。ユ

²⁶ <http://www.persistent.org/airsketcher.html> より引用した。

²⁷ <http://www.persistent.org/smoon.html> より引用した。

ユーザーは部屋の天井に設置されたカメラのリアルタイム映像が映し出されたタブレット上でペインティングを行うことによって、部屋の中の輝度分布を自由にデザインすることができる。システムはユーザーによって指定された輝度分布を満足させるようなライトのパラメータの組み合わせを最適化によって求め、その結果を直ちにライトに反映させる。GPUを用いた並列処理によって最適化計算が高速に行われ、ユーザーは塗りながらライティングの結果を確認することができる。ミニチュアスケールの実験環境を構築し、ライトの明るさおよび方向を個別に直接指示する手法と提案手法を比較した結果、提案手法に優れた結果が得られた。



図 1-36^[35] ユーザーインターフェース

(12)クッションやぬいぐるみのような柔物体に加えられた、荷重や変形を測定するための技術の開発 (FuwaFuwa)

Takehiらは、クッションやぬいぐるみなどの柔らかい物体の形状変形を測定するための丸型のハンドサイズの無線デバイスである「FuwaFuwa」センサーモジュールを提案した^[36]。複雑な設置手順を必要とせず物理的な接続は不要なため、オブジェクトの柔らかさを損なうことなく家庭内の典型的なソフトオブジェクトに埋め込むことができる。モジュール内の6つのLEDは、6つの直交する方向にIR光を放射し、6つの対応する光センサーが反射光エネルギーを測定する。物体に複数の「FuwaFuwa」センサーモジュールを埋め込むことによって、ほぼあらゆる柔らかい物体をタッチ位置と表面変位の両方を検出できるタッチ入力デバイスに容易に変換することができる。本研究は2011年に、エンタテインメントコンピューティング 2011において口頭発表賞を、また、2012年に日本デザイン振興会 2012においてFuwaFuwaを装着したクッションがグッドデザイン賞を受賞した。

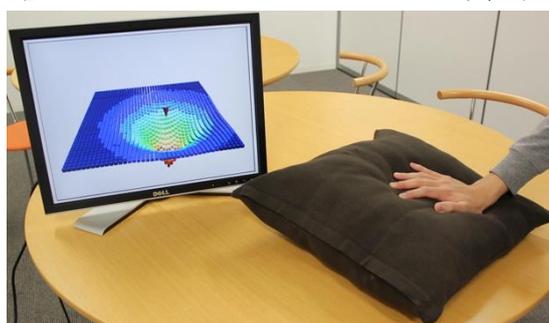


図 1-37^[36] FuwaFuwa によってタッチした場所が表わされる

(13)ぬいぐるみに動きを与えるリング型のデバイス (PINOKY)

Sugiura らは、一般的なぬいぐるみの手足、尻尾などの部位を動かすことができるデバイス、「PINOKY」を開発した^[37]。デバイスはリング型で、アクセサリ感覚でぬいぐるみに取り付けることができる。本デバイスは、モーターによってぬいぐるみの表面の布を外側から引っ張ることで屈曲を実現する。従来手法は、ぬいぐるみの内部に機構を埋め込み駆動させることが一般的であったが、本提案ではぬいぐるみを切り裂くなどの加工を加えることなく、ロボット化することが可能である。本デバイスを一般のユーザーに利用してもらい、容易に扱えることを確認した。本研究は 2013 年に、8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2013) において Honorable Mention Demonstration Award を受賞した。



図 1-38^[37] ぬいぐるみの右腕に取り付けた PINOKY によって、右腕が動く。

(14)薄くて伸縮性のある皮膚のようなインタフェース (Metaskin)

Sugiura らは、平らな曲面などに取り付けて使用する、薄くて伸縮性のある皮膚のようなユーザーインタフェース「Metaskin」を開発した^[38]。このインタフェースは、赤外線 LED、ストッキングとゴム膜のようなフォトランジスタと弾性の織物から成る複数のフォトリフレクターで構成される。布に光を照射しながら伸縮させたときに、布の編み目の大きさに伴い光の透過率が変わるため反射率も変化する。この反射光をセンサーで捉えることで伸縮率を計測できる。本手法は、布にセンサーを接近させるだけで実現できるため、i) これらを接着する必要がなく布の柔軟性を損なわない；ii) 貼付ける対象に合わせてセンサーの個数やインタフェースの面積を変更できる；iii) センサーが小型で薄さを保つことができる、という特徴がある。

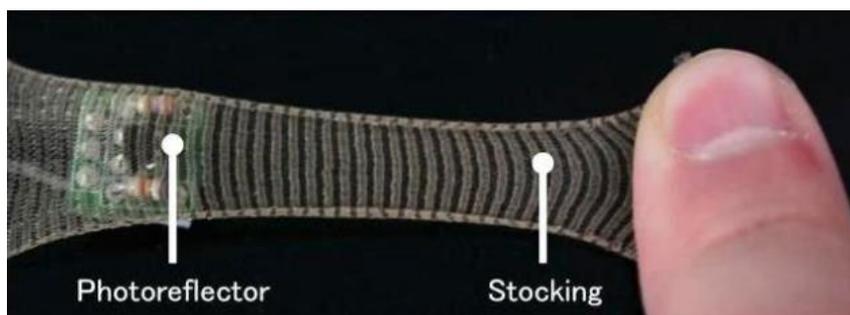


図 1-39^[38] 提案された伸縮性センサーでエラスチックファブリックに加えられた接線力を測定。

(15) 動きと音声同期したターンテーブル型プレゼンテーションシステム (SyncPresenter)

渡邊らは、ターンテーブルの上に物を載せ 動かしながら動きと音声を記録しその動きと音声をそのまま再生するプレゼンテーションシステム「SyncPresenter」を開発した^[39]。人は身振りと声であらゆることを表現するが、この時身振り(動き)と声同期することが強い存在感を与え強い表現力を与えると考えられる。このシステムによって誰でも簡単な操作で物を動かしながら説明できるので、人の注目を集め、物を魅力的に見せることを容易に実現できる。



図 1-40²⁸ SyncPresenter、ターンテーブルが回り、音声による商品説明が入る。

(16) 無線操縦ロボットのプロトタイピングのためのマイコンボード (Locomo)

橋本らは、主にモーター駆動の移動ロボットをターゲットとした、無線操縦ロボットのプロトタイピングのためのマイコンボード「Locomo」を開発した²⁹。通常このようなロボットを作る場合、マイコンや無線モジュール、モータードライバーなどの複数のパーツから構成される複雑な制御回路を自分で作る必要があるが、「Locomo」はその工程を簡略化する。Arduino とのソフトウェア互換性、3 個の DC モーターおよび 2 個のサーボモーター制御、センサー用のアナログ入力端子 6 個、モード切り替え XBee エクスプローラとして動作可能といった機能を持っている。オープンソースハードウェアとして公開しているほか、一般向けの販売も行っている。

²⁸ <http://www.persistent.org/syncpresenter.html> より引用した。

²⁹ http://kougaku-navi.net/locomo_R1/index.html



図 1-41³⁰ Locomo

1.5.4 まとめ

本プロジェクトでは、スケッチによる入力による CG デザインを容易に行えるヒューマンインタフェース、非人工物の物体の設計を行うための新しい CAD ヒューマンインタフェース、ロボットに行動をより直感的に教示するためのインタフェースなど、これまでにない新しいデザインインタフェースの技術基盤を確立し、実用化へ向けた潮流を生み出すところまで研究が進んだ。

これらの研究は一部を除いてお互いに独立した幅広いテーマにわたっており、全体を束ねるのは、「一般のユーザーが種々のものを自ら手軽にデザインできる新たなユーザーインタフェースの実現を目指す」という理念である。この理念を湧点としたさまざまな研究が行われた成果をここに見たが、それらがどう発展したかを第 2 章以下で展望する。

³⁰ <http://kougaku-navi.net/locomo/index.html> より引用した。

第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況

2.1 各研究テーマの現在の状況に関する基礎データ

2.1.1 調査方法

調査は、文献調査(プロジェクト報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・受賞など)の調査からなる基礎データ調査と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査により行った。これらに基づき、プロジェクト期間中および終了後の成果の現時点での発展状況及び波及効果等についてまとめた。

(1)基礎データ調査の方法

基礎データ調査は、基本的にプロジェクトメンバー全員を対象として、プロジェクトの研究に関連した成果の発展状況について、文献による成果の把握と、論文や研究助成金の獲得状況等のデータ調査を行った。各項目について利用したデータベースと調査範囲等を以下に記す。

①論文

プロジェクト期間中の論文は、プロジェクトの終了報告書に成果論文としてリストアップされている論文とした。成果論文リストの中で *in press*、*submit* 等と表記があり、その後発表されたものについても基本的には期間中の論文とした。

プロジェクト終了後の論文は、2014年4月以降に発表され、かつプロジェクトメンバーが著者になっている論文を収集した(ただし、プロジェクト期間中の論文に含まれるものは除く)。収集した論文の中で、プロジェクトとの関連を Abstract 等で確認し、関連のあるものを関連論文としてリストアップした。

データベースは、Scopus 及び Web of Science を利用した。

②競争的研究資金の獲得状況

プロジェクトメンバー全員を対象として、研究内容がプロジェクトの研究内容に関連している研究課題について調べた。

データベースとしては、調査対象者の所属する研究室や本人の WEB サイト及び KAKEN 科学研究費助成事業データベース等の競争的研究資金に関する検索サイトと、補助的に Google 等の検索サイトを利用した。

③特許の出願・登録状況

プロジェクト期間中の特許は、プロジェクト終了報告書の成果リスト記載の特許とした。

プロジェクト終了後の特許は2014年4月以降に出願された特許で、かつプロジェクト関係者が発明者に入っているものから、プロジェクトの成果と関連のある特許を収集した。

データベースは、PatentSquare と、補助的に特許電子図書館、espacenet を利用した。

④招待講演

本プロジェクト関係者の終了後の招待講演実績を調査対象者の所属する研究室や本人のWEBサイトの調査、Google等の検索サイト、①で記述した文献データベースの会議録情報等を併せて収集し、かつ、研究総括およびグループリーダーへのインタビューの際に主な招待講演について確認した。

(2)インタビュー調査の方法

インタビュー調査は本プロジェクト関係者(研究総括、グループリーダー)および外部有識者について行った。プロジェクト関係者へのインタビューでは、基礎調査での収集情報を基に、本プロジェクトとの関連や、その後の展開等についての情報を収集した。また外部有識者からは、本プロジェクトの成果及び、研究総括の研究をよく把握している研究者にプロジェクト外部から見た本プロジェクトの意義や、当該研究分野における波及効果等の情報を収集した。

2.1.2 競争的研究資金の獲得状況

本プロジェクトを含めて現時点までに獲得した競争的研究資金の状況(総額1千万円以上)を、表2-1に示す。

表2-1 競争的資金の獲得状況(2018年7月30日時点)

No	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	研究代表者	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	金額(億円)
1	2007~2013	ERATO	五十嵐デザインインターフェース	五十嵐 健夫																		8.99
2	2006~2010	CREST	オンラインゲームの制作支援と評価 [デジタルメディア作品の製作を支援する基盤技術]研究領域	松原 仁 (稲見 昌彦)																		3.08
3	2006~2010	CREST	デバイスアートにおける表現系科学技術の創成[デジタルメディア作品の製作を支援する基盤技術]研究領域	岩田 洋夫 (稲見 昌彦)																		3.43
4	2008~2008	科研費 基盤研究(B)	統合的人体シミュレーションを目指したバーチャル心臓の機能モジュール化の研究	中沢 一雄 (五十嵐 健夫)																		0.17
5	2008~2009	さきかけ	折紙のデジタルアーカイブ構築のための基盤技術とその応用[デジタルメディア作品の製作を支援する基盤技術]研究領域	三谷 純																		1.19
6	2007~2009	科研費 基盤研究(B)	製品の身体適合性評価指標の開発	福井 幸男 (三谷 純)																		0.13

No	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	研究代表者	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	金額(億円)
7	2007~2010	科研費 若手研究(A)	視覚・前庭感覚統合伝送システム	稲見 昌彦		■	■	■	■													0.22
8	2010~2015	CREST	文字・文書メディアの新しい利用基盤技術の開発とそれに基づく人間調和型情報環境の構築[共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築]研究領域	黄瀬 浩一 (稲見 昌彦)					■	■	■	■	■									2.47
9	2011~2014	科研費 若手研究(A)	光学式時空間フィルタによる速度知覚調整システム	稲見 昌彦							■	■	■									0.25
10	2012~2014	総務省 戦略的情報通信研究 開発推進事業 (SCOPE) ICTイノ ベーション創出型研 究開発	柔軟物コンピューティング基盤の研究 開発	稲見 昌彦								■	■									0.60
11	2013~2015	科研費 基盤研究(B)	先天性心疾患の診療支援をめざしたリアルタイム心拍動・マルチタッチ変形シミュレータ	中沢 一雄 (五十嵐 健夫)									■	■								0.19
12	2014~2018	科研費 基盤研究(A)	マイクロタスク型クラウドソーシングによるメディアコンテンツ生成のための基盤技術	五十嵐 健夫												■	■					0.42
13	2014~2017	科研費 若手研究(A)	近接電力伝送の時空間操作による移動体の制御	杉浦 裕太												■	■					0.21
14	2015~2018	科研費 基盤研究(A)	身体共役系に基づく身体像拡張の機序解明とモデル化	稲見 昌彦													■	■				0.43
15	2015~2019	科研費 新学術領域	コンピュータグラフィックスによる質感表現技術	土橋 宣典 (藤堂 英樹)													■	■	■			0.42
16	2018~2018	国際科学技術協力基盤整備事業 (SICORP) 「超高齢社会における高齢者のケアと支援のためのICT」分野	超高齢化社会における社会参加のための人間拡張・遠隔就労技術の研究	稲見 昌彦													■	■				0.18
17	2018~2018	科研費 基盤研究(A)	超人スポーツのための個人別環境身体ダイナミクス同定技術と身体能力拡張技術の研究	持丸 正明 (稲見 昌彦 杉浦 裕太)													■	■				0.44
18	2018~2021	CREST	経験サプリメントによる行動変容と創造的協働[人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築]研究領域	黄瀬 浩一 (稲見 昌彦)													■	■	■			-
19	2017~2019	科研費 基盤研究(A)	パーソナルファブリケーション時代のための対話的実世界形状処理技術	五十嵐 健夫													■	■				0.45
20	2017~2021	AMED 未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業	術前と術中をつなぐスマート手術ガイドソフトウェアの開発	齋藤 延人 (五十嵐 健夫)														■	■			-
21	2017~2022	CREST	データ駆動型知的情報システムの理解・制御のためのインタラクション[人とインタラクションの未来]研究領域	五十嵐 健夫														■	■	■		-
22	2017~2022	ERATO	稲見自在化身体プロジェクト	稲見 昌彦														■	■	■		-

2018年7月30日検索

助成元	
JST	
科研費	
日本医療研究開発機構(AMED)	
総務省	

表 2-2 競争資金研究の概要(2018年7月30日時点)

No	概 要
1	本プロジェクト
2	研究概要：小型ロボットを利用した携帯型 Kawaii ユーザーインターフェース (KUI)として、背中に光センサーを有しその動きを制御することが可能な Stickable Bear を開発した。また、ユーザーや環境を構成する情報機器の位置を容易に把握することができる仕組みとして、特定の方角に向け覗き込むと一人称的視点で空間を直感的に把握することができるデジタル透視テレスコープ「フラヌール」を開発した。デバイスはGPSセンサーと方位センサーを備えているため、特定の方角に向けるとその先にある店や景色のイメージ画像を任意な場所から閲覧することができる。Stickable Bear は、ディスプレイ内のローカルな位置関係に基づくインタラクションの構築を目標としていたが、自由空間においてできるだけ簡便なシステムで KUI の位置の計測を可能とすることを目的とし、「光レゾルバによる角度計測手法」を開発した。試作した装置は1m程度の距離で1度以内の標準偏差で角度を計測することに成功した。
3	研究概要：「デバイスアート」とは、近年の日本のインタラクティブアートの世界的興隆から導き出された新しい概念で、メカトロ技術や素材技術を駆使し、テクノロジーを見える形でアートにしていくなメディアアート作品を指す。本プロジェクトでは、デバイスアートにおける技術の体系化と、制作と評価の方法論の構築を目的とし、各種インタラクティブガジェット、機能モジュール、生体センシング等の開発を行い、基盤技術として「デバイスアート・ツールキット」の整備を行い、技術体系の構築を進めた。
4	研究概要：統合的人体シミュレーションを目指し、心臓の電気生理学的現象を再現するバーチャル心臓に必要な機能について研究した。スーパーコンピュータによる高速大規模計算技術、ヒト心臓形状抽出のための医用画像処理技術、コンピュータグラフィックスによるバーチャル心臓3次元興奮伝播の可視化技術、効果的なシミュレーションモデル構築のためのコンピュータ・インターフェースのソフトウェア技術など、さまざまな要素技術が更新された。さらに、研究成果の公開や研究資産の共通利用化を図ることにより、フィジオーム研究の連携促進を行うための基盤が整備された。
5	研究概要：折紙の展開図をコンピュータ上で効率的に作図するための専用エディタ、ORIPAの開発を行った。また、実際に折って開いた折紙をスキャナで読み込み、その画像から展開図情報を再構築する手法の研究開発を行った。さらに、そのままでは平坦に折りたたむことができない展開図に対して、内包される頂点が局所平坦条件を満たすように修正を施すプログラムの開発を行った。これにより、コンパクトに折りたたむことが可能な形状を作り出すことができ、物の可搬性を高めることに役立てることができると考えられる。このシステムを用いることで、曲面を含む立体的な折紙作品を簡単な操作で設計できるようになった。また、完成イメージを3次元CGで表示できるようにし、実際の試行錯誤の手間を大幅に減らすことに成功した。この手法によって設計した立体折紙の活用方法として、ランプシェードや、服飾デザインへの応用、パッケージやラッピングなどへの応用が考えられる。
6	研究概要：身体装着製品の適合性を高める設計支援技術の開発を行った。身体装着製品の中でも体重を支える靴製品に着目し、足形状と靴形状と靴を製造する過程で使われる靴型との関係を先行研究で行い、本研究ではその継続として足形状に適合する靴型の設計支援技術と靴型の形状特徴量を抽出して適合性評価指標とする手法の開発を行った。
7	研究概要：機能的電気刺激等による前庭感覚提示の生理学的知見の解明、光学的シャッター方式による振動成分の抽出を行う StopMotion Goggle の開発、そしてオプティカルフローをリアルタイムで検出するための携帯型情報端末でも動作可能なGPUを利用した特徴点抽出ライブラリを開発を行った。これらの要素技術によって、我々生物が知覚しているような安定した「視覚・前庭感覚統合伝送システム」を様々な場面に応用するための基盤技術の開発に成功した。

No	概 要
8	<p>研究概要：人間調和型情報環境の一つの形は、人が特別なことをしなくても、状況に応じて有用なサービスが得られる仕組みである。そのためには情報環境側が人や状況を知り、サービスを提供できなければならない。文字・文書メディアには、「曖昧性解消」と「内容伝達」という2つの役割がある。曖昧性解消は主に看板などのシーン中の文字が果たす役割である。一方、内容伝達は主に文書が担う役割である。本研究では、両者を対象としたリーディングライフログを作成するとともに、前者については人の認識補助、後者については読んだ単語数を数えたり、英語の能力を計測したりするサービスなどを実現した。また、その基礎となる文字認識、文書画像検索、フォント生成などの技術も開発した。</p>
9	<p>研究概要：本研究は速度知覚や移動物体の観察能力を、状況に応じて調整可能な「動きの眼鏡」を開発し、速度知覚のダイナミックレンジを拡大することを目的とし、以下の成果を得た。小型軽量の強誘電性液晶素子で構成された光学式時空間周波数フィルタの試作を行い、提案システムを眼前に設置することで、①移動物体のブレの低減、②移動物体のモーションブラーと輪郭の同時観察、③並行移動物体の拡大および縮小といった知覚制御を実現した。これらの知見を用いて、実空間における移動時の速度知覚や移動物体を強調、あるいは逆に認知不可を下げるシステムへの応用が期待できる。</p>
10	<p>研究概要：柔軟物コンピューティングの基盤を構築するため、①柔軟物を計測システムとして利用した、人の行動の計測及び心的状態の推定；②柔軟物の柔軟性を利用した情報提示と、行動や情動の誘発；③柔軟物を介した情動を伴うコミュニケーションの3テーマに関し研究開発を行った。これにより住環境に存在する多様な柔軟物とより自然な形でインタラクションし、情報のやりとりをすることが可能になる。本プロジェクトでは「柔軟物コンピューティング」というビジョンを世界にさきがけて提案し、そのビジョンを示す研究成果は SCOPE の研究開発期間を通して創出できた。</p>
11	<p>研究概要：先天性心疾患の診療を支援する実用性の高いシミュレータのための技術開発を行った。先天性心疾患の3次元心臓形状モデルは造影CT画像より生成した。タブレットPCにおいて弾性体シミュレーションを実行させて、インタラクティブに先天性心疾患の心臓モデルを引っ張ったり切れ目を加えたりして内部構造を確認できるシミュレータを作成した。さらに、リアルタイムに心拍動を実現するシミュレータの医療応用を進めた。このシミュレーション技術は、医師にとって複雑な先天性心疾患の心臓を理解するのみならず、患者および患者家族とコミュニケーションをとるにも有効であることが示された。</p>
12	<p>研究概要：3次元モデリングのプロセスを単純な作業へと分割することで、Amazon Mechanical Turkをはじめとしたマイクロタスク型クラウドソーシングを用い、一枚の画像をもとに3次元モデルを生成する手法を提案した。マイクロタスク型クラウドソーシングではワーカーに特定の技術が要求されないため、システムは膨大なワーカープールを活用することができ、多数のリクエストに対して短時間かつ一定品質で出力を与えることができる。また、既存の自動的な単一画像からの立体生成手法と異なり、人間の視覚認知機能を活用することで写真からイラストまで様々な種類の入力画像に対応することができる。本研究では、スケッチの品質を段階的に向上させるための、ワーカー間での競争と協力の要素を組み合わせた反復的なワークフローも提案し、このシステムによって様々な種類の3次元モデルを短時間のうちに生成することができることを示した。</p>
13	<p>研究概要：近接エネルギー伝送の考えに基づき、移動体に対してワイヤレスでエネルギーを供給することで、移動体を制御する研究を行なった。二次元通信シート上の電界強度マップを作成し、配置されたアンテナの位置推定を行うシステムの開発を進め、その結果から周波数を変化させたときの二次元平面のそれぞれの任意の点における特徴的なデータを得た。そこで、教師有り機械学習であるSupport Vector Machineを用いて識別器を作成して、アンテナを配置された位置の識別を実現した。その識別率は、最も低い点でも86.5%であり、比較的高い識別率となった。</p>
14	<p>研究概要：身体共役系を実現するために構築した、①ユーザーの身体情報を取得する3次元計測装置、②身体性を変更可能なアバターを含むバーチャル環境、③没入型の視覚情報提示装置というフレームワーク、および心理物理実験のための基礎技術を活用し、それぞれ感覚提示ごとに実験を行った。まずユーザーが能動的に身体を動かした場合、学習を行わせた後に、そのときのユーザーの反応を計測することで自己投射が確立しているかを評価した。次に、受動的に感覚提示された場合、具体的にはラバーハンドイリュージョンのように受動的な刺激を受けている条件において、操作対象に対応した身体像を学習できるかを検証した。さらにバーチャル環境におけるアバターの胴体部分の透明化や、バーチャルな腕部と実環境の腕部を対応付けるにとどまらず、装着型のロボットアームを開発することにより実環境においても身体像の編集を試みた。またそのロボットアームの操作を身体の他のどの部位に対応付けると学習しやすいかなど検討した。</p>

No	概 要
15	研究概要：CT計測を用いて精密なCG画像生成を行う仕組みを開発し、実写並のCG映像の生成に成功した。並行して、光の散乱や相互反射を考慮した精密なCG画像を効率よく生成するための効率化手法も新たに開発した。さらに、質感の編集に関する複数の応用研究を実施し以下の成果を得た。イラストなどの抽象化された画像に含まれる物体の反射率と形状を推定する手法を開発。3次元モデルから非写実的な映像を高精度かつ効率的に生成する手法を開発。音響による質感解析に関する研究として、音波による野菜の鮮度判定手法と切断音による野菜の種類を認識する研究、食べ物の配置問題に関する研究、さらに動画データベースを利用して水の静止画を動画化する研究を実施した。また、配色問題、家具配置問題、要素選択ユーザーインターフェース、流体の表現および任意の質感を表現できる特殊な反射板の設計に関する研究を行った。
16	研究概要：本研究は、ヒューマンコンピュータインタラクション、バーチャルリアリティ、人間拡張技術を活用してテレワークに伴う高齢者特有の心理的・身体的制約を打破する「超人テレワークシステム」を実現し、元気高齢者の遠隔就労と社会参加を促進することを目的とする。具体的には、日本側はテレプレゼンス技術および心理的・身体的人間拡張技術の開発、台湾側は高齢者にも使いやすいインターフェースデザイン・UXデザインを担当し、高齢者のアクティブな社会参加を可能にする遠隔就労技術の研究を行う。日台の研究チームが相互補完的に取り組むことで、高齢者にとって使いやすく、高齢者の持つ心理的・身体的制約を超えてアクティブに社会参加することを促す実用的な遠隔就労システムの実現が期待される。
17	未報告
18	研究概要：人が直面する多くの問題は、既に誰かが経験し解決したものである。本研究ではこの点に着目し、経験をデジタルデータとして抽出、経験バンクに記録して流通させることで創造的協働を実現する。その際、ユーザーが記録された経験を受け入れてより容易に行動変容するために、認知バイアスを考慮し、経験サプリメントと呼ぶユーザー適合した情報に変換する。また以上の処理を、学習、健康、スポーツとエンタテインメントの分野で実証する。
19	未報告
20	未報告
21	研究概要：機械学習に代表されるようなデータ駆動型の知的情報処理技術が注目を集めている。本研究では、そのようなデータ駆動型知的情報処理システムを対象として、データの生成過程、学習プロセス、さらに学習した結果を利用する場面において、システムの中で何が起きているのか正しく可視化し、ユーザーによる適切な介入を可能とするためのインタラクション技術の研究開発を行う。
22	研究概要：本プロジェクトでは、超スマート社会に適応可能な「自在化身体」を構築する技術基盤を確立することを目指す。「自在化」と位置づけられる技術開発は、人間がロボットやAIと「人機一体」となり、自己主体感を保持したまま行動することを支援し、人間の行動の可能性を大幅に広げると考えられる。自在化身体を実現するために、身体・行動のシステム的な理解に基づき、VR・ヒューマンアシティブロボット・ウェアラブルコンピューティング・脳情報デコーディング・機械学習などを用いて、人間と情報環境との関係性を柔軟に設計する「身体性編集」に関する基礎的知見の解明と設計指針を確立する。さらに、設計した自在化身体およびそれがもたらす心と社会の変容を、実社会とバーチャル社会において検証する。

2.1.3 論文の発表状況

(1) 本プロジェクトの成果論文

プロジェクトの成果論文について、累積発表論文数と累積被引用数の推移を図2-1に示す。

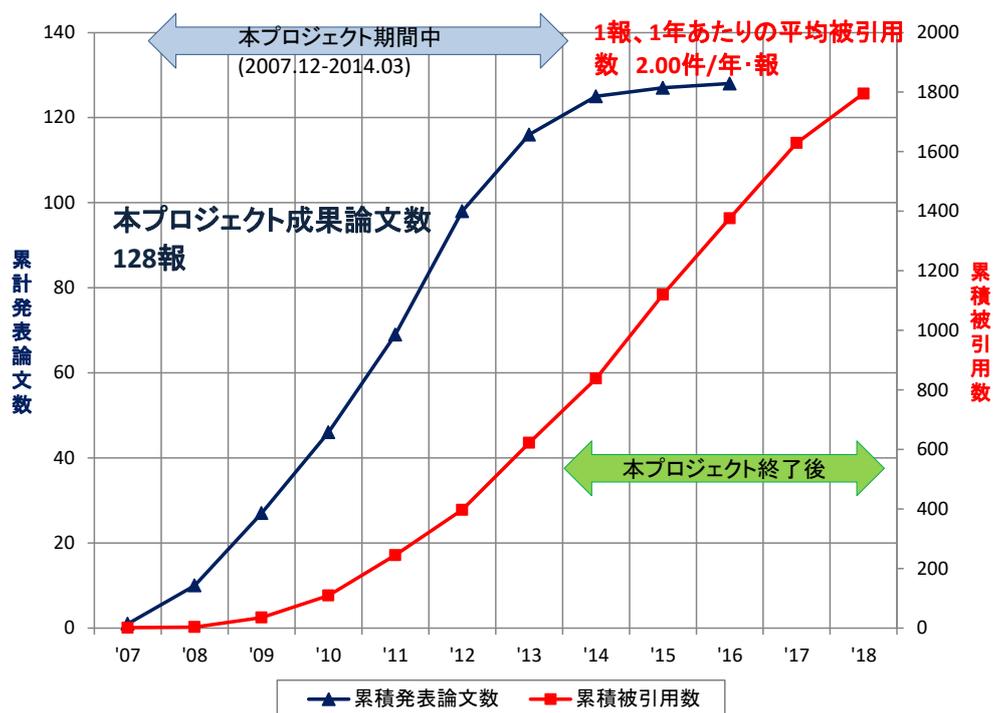


図 2-1 プロジェクトの成果論文の発表論文数と被引用数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2018 年 10 月 31 日)

プロジェクトの成果論文の被引用数上位 5 位の論文について、被引用数の年次推移を図 2-2 に示す。

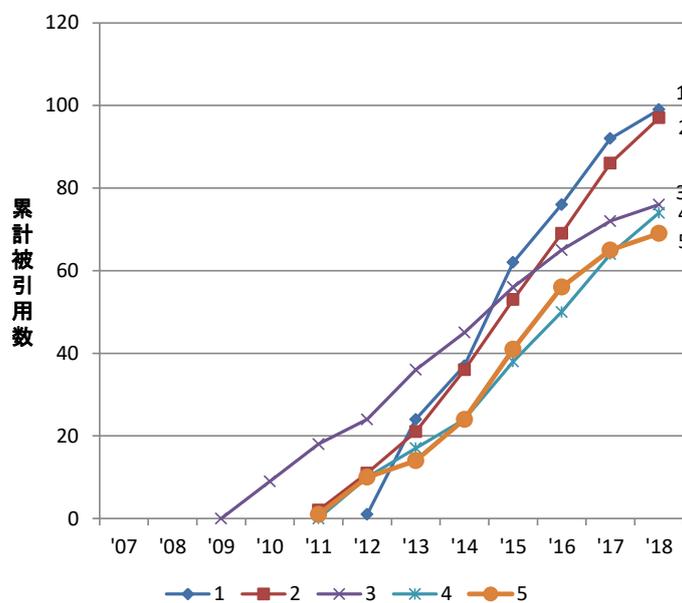


図 2-2 プロジェクトの成果論文の内、被引用数が上位 5 位の論文における被引用数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2018 年 10 月 31 日)

表 2-3 プロジェクトの成果論文の内、被引用上位 5 件の論文概要³¹

No	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	ページ	発行年	引用数	IF 2017
1	Guided exploration of physically valid shapes for furniture design	Umetani N., Igarashi T., Mitra N. J.	ACM Transactions on Graphics	31	4	86	2012	99	4.384
<p>図形の幾何学的なモデリングと物理的な有効性は伝統的に独立して考えられており、美しく魅力的でかつ物理的に正しいモデルの作成は挑戦的な課題である。Umetani らは、幾何学および物理的に有効な形状を、効率的かつ直感的に探索できるインタラクティブな設計フレームワーク「Guided Exploration」を提案した。このシステムでは、幾何学的な編集を行う際には編集されているパラメータの有効範囲が継続的に可視化され、編集操作時に制約が満たされなかった場合には、有効性を復元するために離散的及び連続的のどちらの変更も伴った複数の候補を生成する。ユーザーが美しくデザインすることに目を向けている際にこれらの動的なガイダンスを提供することで、物理的な有効性を満たしたデザインの手助けをすることができる。</p>									
2	SketchChair: An all-in-one chair design system for end users	Saul G., Lau M., Mitani J., Igarashi T.	Proceedings of the 5th International Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction, TEI'11			73-80	2011	97	-
<p>初心者のユーザーが自分の椅子の設計と構築のプロセス全体を制御できるようにするアプリケーション「SketchChair」の開発を行った。ユーザーが画面にデザインしたい椅子の輪郭をスケッチすると、自動的に 3 次元の椅子が生成される。生成された椅子については、仮想的に人間を座らせることですわり心地やバランスを試すことができる。また、自動的に平面の板の型からなる設計図が生成され、その設計図にしたがってレーザーカッターにより板を切断して組み立てることで、実物の椅子を製作することができる。一般向けの椅子デザインワークショップを開催し、椅子をデザインした経験のない素人のユーザーでも簡単に椅子をデザインできることを確認した。</p>									
3	Structured annotations for 2D-to-3D modeling	Gingold Y., Igarashi T., Zorin D.	ACM Transactions on Graphics	28	5	148:01-09	2009	76	4.384
<p>スケッチや写真の 2 次元イメージから自由曲面の 3 次元モデルを生成するシステムを提案した。3 次元モデルは 2 次元画像にプリミティブと注釈を配置することによって作成する。このプリミティブは、一般的に使用されるスケッチの規則に基づいており、ユーザーはモデルの単一ビューを維持することができる。これは既存の 3 次元モデリングツールに固有の煩雑なビューの変更と伝統的なスケッチベースの両方を排除し、2 次元ガイドの画像への入力の一貫性を可能にする。注釈は（同じ長さや角度、位置の整合、ミラー対称性、および接続の曲線）、ユーザーがより高いレベルのセマンティック情報を伝達できるようにして、それを通して本システムは、元のイメージに一貫性がない場合においても一貫したモデルを構築する。</p>									
4	Converting 3D furniture models to fabricatable parts and connectors	Lau M., Ohgawara A., Mitani J., Igarashi T.	ACM Transactions on Graphics	30	4	85	2011	74	4.384
<p>CG 用に作られた家具の 3 次元形状データに対し、実際に制作する際に必要となるモデルから実際に制作するための部品や取付金具を自動生成し、家具の部材の組み合わせ構造を表現する形式文法と構造推定手法を開発した。提案手法では、キャビネットやテーブルなどの基本的な家具の構造を表現するための形式文法をあらかじめ定義し、それを構造解析に使用した。この形式文法によって生成される有向グラフは一つの家具モデルを表し、各々のノードは部品、エッジは部品の結合を表し、これらの情報は、各部品の接続関係や、釘や蝶番などの取り付け金具の位置および数を</p>									

³¹ IF(InPact Factor) : クラリベイト・アナリティクスのデータベース、Journal Citation Reports を基に記述。算出方法は、

A=対象の雑誌が 2015 年に掲載した論文数

B=対象の雑誌が 2016 年に掲載した論文数

C=対象の雑誌が 2015 年、2016 年に掲載した論文が 2017 年に引用された延べ回数

∴C÷(A+B)=2017 年のインパクトファクター

No	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	ページ	発行年	引用数	被引	IF 2017
	特定するときに利用される。									
5	Sensitive couture for interactive garment modeling and editing	Umetani N., Kaufman D.M., Igarashi T., Grinspun E.	ACM Transactions on Graphics	30	4	85	2011	69		4.384
	2次元パターンの生成と3次元の高忠実度模擬ドレープフォームとの間の双方向設計と編集機能を提供する、インタラクティブな衣服デザインツール、「Sensitive Couture」(SC)を開発した。SCは、連続したインタラクティブで自然なデザインモダリティを提供し、2次元デザインと3次元ドレープフォームが同等のステータスを受け取り、同時に表示され、対応をシームレスに維持する。アーティストは2次元パターンデザインをインタラクティブに編集し、これらの変更が3次元フォームにどのように影響するかを安定した正確なフィードバックとしてオンラインですぐに得ることができ、迅速なプロトタイピングと複雑なドレープフォームの直感的な理解を可能にする。									

検索日：2018年10月31日

(2) プロジェクトの成果の発展及び波及に係る発表論文

プロジェクトの成果の発展及び波及に係る論文について、累積発表論文数と累積被引用数の推移を図 2-3 に示す。

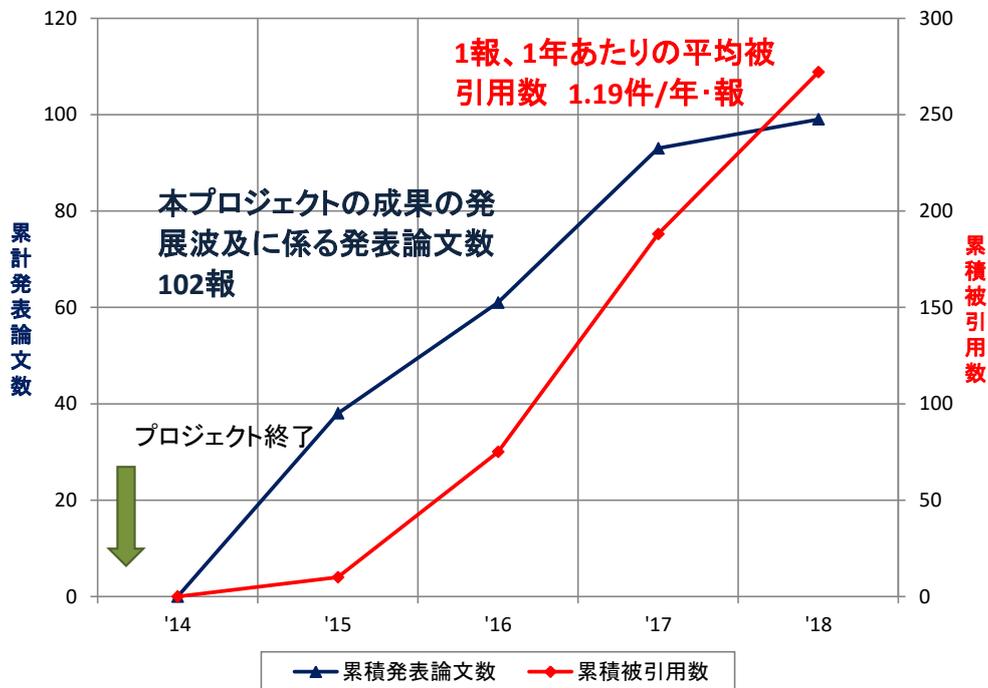


図 2-3 プロジェクトの成果の発展及び波及に係る発表論文数と被引用数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2018 年 10 月 31 日)

プロジェクトの成果の発展及び波及に係る発表論文の内、被引用数上位 5 位の論文について、被引用数の年次推移を図 2-4 に示す。

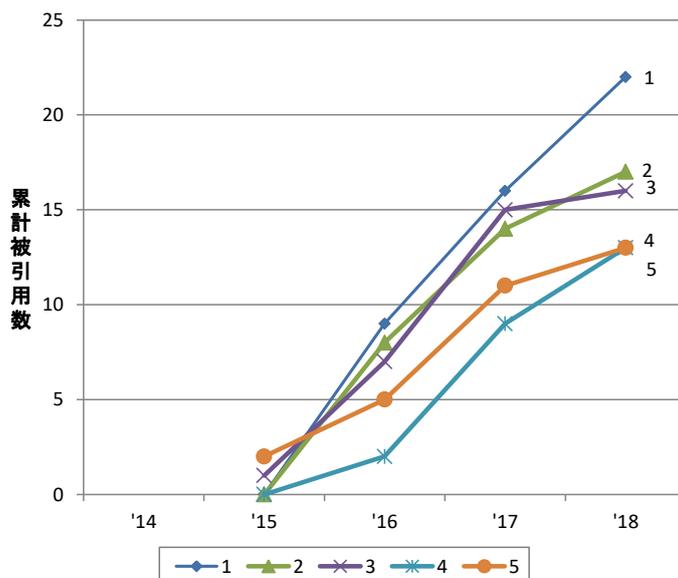


図 2-4 プロジェクトの成果の発展及び波及に係る発表論文の内、被引用数が上位 5 位の被引用数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2018 年 10 月 31 日)

表 2-4 プロジェクトの成果の発展及び波及に係る発表論文の内、被引用上位 5 件の論文概要

No	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	ページ	発行年	引用数	IF 2017
1	AutoConnect: Computational design of 3D-printable connectors	Koyama Y., Sueda S., Steinhardt E., Igarashi T., Shamir A., Matusik W.	ACM Transactions on Graphics	34	6	231	2015	22	4.384
<p>2 つの物理的オブジェクトを結合したカスタム化された 3 次元印刷可能なコネクタを自動作成する方法、「AutoConnect」を開発した。ユーザーは接続したい 2 つのオブジェクトの仮想モデルを単純に配置して方向付けし、重量や寸法などの補助情報を表示する。次に「AutoConnect」は、ユーザーが 3 次元印刷用に選択できるいくつかの代替デザインを作成する。コネクタのデザインは、各オブジェクトに 1 つずつ、2 つのホルダーを組み合わせることによって作成される。ホルダーは 2 つのタイプがあり、最初のタイプはパイプや平面などの標準オブジェクトを保持し、2 つめのタイプは自由形式のオブジェクトを保持する。これらはオブジェクトの幾何学的解析に基づいて作成されたシェルグリッパーデザインである。</p>									
2	Architecture-scale human-assisted additive manufacturing	Yoshida H., Igarashi T., Obuchi Y., Takami Y., Sato J., Araki M., Miki M., Nagata K., Sakai K., Igarashi S.	ACM Transactions on Graphics	34	4	88	2015	17	4.384
<p>最近のデジタルファブリケーションツールは、パーソナライズされたラビッドプロトタイピングへのアクセスを可能にした。しかしながら、そのようなツールは（小型の）製品規模のオブジェクトに限定されている。本研究はアーキテクチャ規模のオブジェクトを印刷するための新しい手法を提案した。これには、(i) 費用効果が高く、環境的に持続可能なチョップスティック (CS) と糊で構成される建設資材、(ii) CS と糊の複合材料の一貫した供給を可能にするハンドヘルド CS ディスペンサー、(iii) デブスカメラとプロジェクタで構成された投影マッピングを使用する印刷ガイドシステムシステムの 3 つの開発が含まれる。この印刷ガイドシステムは、リアルタイムで所定の形状を評価し、建設中のフォームに単純なカラーコードを投影することによって、人が CS を置くべき場所を示す。提案された方法のケーススタディとして実験パビリオンを設計し、足場やフォームワークなしで構築した。</p>									
3	Quantifying reading habits - counting how many words you read	Kunze K., Masai K., Inami M., Sacakli O., Liwicki M., Dengel A., Ishimaru S., Kise K.	UbiComp 2015 - Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing			87- 96	2015	16	-
<p>読書は一般的な学習活動であり、多くの人が毎日それを実行している。しかし、我々は毎日の読書の習慣についてはほとんど分かっていないので、それらを定量化することで多くの洞察を得ることができる。本研究は読書ログを確立し、人がいつどのくらい読書をしているかを追跡した初めてのものである。眼球の動きを検出するための統合された電極と、頭の動きをモニターするためのモーションセンサーを備えたスマート眼鏡を使用してユーザーが読んだ単語を推定することのできるアプローチを提示した。それを 5 つの異なった読書デバイス (e-インクリダー、スマートフォン、タブレット、紙、コンピュータスクリーン) で 24 人のユーザーが 3 回以上実験したユーザー非依存アプローチで評価した。合計 30 時間の記録にわたってエラー率が、5% (医療用電気眼球図記録システムを使用) または 15% (光学式アイトラッキングによって捕捉された眼球運動に基づく) と低かった。</p>									
4	Novel 3 Dimensional virtual hepatectomy simulation combined with real-time deformation	Oshiro Y., Yano H., Mitani J., Kim S., Kim J., Fukunaga K., Ohkohchi N.	World Journal of Gastroenterology				2015	13	3.3
<p>3 次元プリントで肝臓モデルを作成することはコストがかかり、内部構造の視認性もやや阻害される。Oshiro らは、これらの問題を同時に解決する新しい構造を持つ肝切除術用の 3 次元プリントされた肝臓を開発した。この構造は、3 次元プリントにコストがかかる透明材料を使用せずに、外側のフレームを肝臓の表面に沿って設置したので、構造物の内部を直接観察することができる。この新しい 3 次元プリント肝臓モデルを用いて切除線を明確にシミュレートし、手術を安全に行うことができた。本手法のプロセスはコスト効率が高く、生産時間が短く、他のプロセスよりも視認性が向上した。このアプローチは将来の外科手術に有用となるであろう。</p>									

No	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	ページ	発行年	引用数	被引	IF 2017
5	Smart eyewear for interaction and activity recognition	Ishimaru S., Kunze K., Tanaka K., Uema Y., Kise K., Inami M.	Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings	18		301 - 307	2015		13	-
<p>眼球の動きを検出する(Electrooculography, EOG)ための統合された電極と、頭の動きをモニターするためのモーションセンサー(加速度計およびジャイロスコープ)を備えたスマート眼鏡 J!NS MEME の初期プロトタイプを使用するアプリケーションを開発し、以下のようなデモンストレーションを行った。左目/右目の動きおよびまばたきの検出する単純な目の動きの視覚化を示した。また、ユーザーは目の動きを使って鳥が障害を避けるよう助ける必要があるゲーム、「Blinky Bird」をプレイできることを示した。さらに、まばたき、目の動き、頭の動きの組み合わせを使用する、読書および発言行動のオンライン検出を実装した。</p>										

検索日：2018年10月31日

2.1.4 特許の出願・登録状況

本プロジェクト期間中から現在に至るまでの特許出願状況を表2-5に示す。備考欄に当該発明にかかわる研究が記載されている項目番号を示した。これからここに挙げた発明がどの分野におけるものかが容易にわかるが、期間中の発明では映像表現関係が2件、生活デザイン関係が2件、ロボット行動関係が28件(うちマッサージ機器に4件あるので、実質25件)、またプロジェクト終了後は、それぞれ2、1、1件であった。期間中にロボット行動関係の発明が圧倒的に多いのは、研究の成果としてデバイスなどの有形な「もの」を生み出したからである。

表2-5 プロジェクトの特許出願状況(2018年11月4日 検索DB:PatentSquare) 期間中

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
1	特願 2009-15160	特開 2010-172359	年金不納による抹消	特許第 5170565号	シェンドング チャオ, 五十嵐 健夫, 中村 晃一, 石井 健太郎	国立研究開発法人科学技術振興機構	家事支援システム及び家事支援プログラム	-	-	-	1.5.3 (1)
2	特願 2009-27282	特開 2010-179435	年金不納による抹消	特許第 5046053号	石井 健太郎, 五十嵐 健夫, 稲見 昌彦, シェンドング チャオ, 今井 倫太	国立研究開発法人科学技術振興機構	ロボット制御システム及びロボット制御方法	-	-	-	1.5.3 (3)
3	特願 2009-38905	特開 2010-198064	年金不納による抹消	特許第 5158808号	坂本 大介, 五十嵐 健夫, 本田 浩一郎	国立研究開発法人科学技術振興機構	ロボット制御システム及びロボット制御方法	-	-	-	1.5.3 (2)

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
4	特願 2009- 10827 0	特開 2010- 253640	登録 (権利 有)	特許 第 5464 406 号	アルバート チョー, 杉浦 裕太, 橋本 直, 稲見 昌 彦, 五十嵐 健夫, 川地 克明, 加賀美 聡, 持丸 正 明	国立研究 開発法人 科学技術 振興機 構, 国立 研究開発 法人産業 技術総合 研究所	姿勢データ 入力装置	-	-	-	
5	特願 2009- 16566 8	特開 2011- 22700	登録 (権利 有)	特許 第 5213 183 号	石井 健太 郎, 竹岡 義 樹, 稲見 昌 彦, 五十嵐 健夫	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	ロボット制 御システム 及びロボッ ト制御プロ グラム	-	-	-	
6	特願 2009- 16772 7	特開 2011- 20218	年金不 納によ る抹消	特許 第 5024 905 号	五十嵐 健 夫, タバレ アキム ゴ ーン, 稲見 昌彦, 高橋 大樹, 杉浦 裕太	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	衣料折りた たみシステ ム、衣料折り たたみ指示 装置	-	-	-	
7	特願 2009- 23087 2	特開 2011- 82621	登録 (権利 有: 審 判完)	特許 第 5305 525 号	五十嵐 健 夫, 稲見 昌 彦, 福地 健 太郎, 杉本 麻樹	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	ネットワー クシステム 及びネット ワークシス テムにおけ るモジュー ルへのID 付与方法	-	-	-	
8	特願 2009- 25219 9	特開 2011- 96190	登録 (権利 有)	特許 第 4973 957 号	梅谷 信行, 五十嵐 健 夫, 三谷 純, 高山 健 志	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	有限要素法 解析方法、有 限要素法解 析装置及び 有限要素法 解析プログ ラム	-	-	-	1.5.1 (9)
9	特願 2009- 26264 5	特開 2011- 108003	年金不 納によ る抹消	特許 第 4952 959 号	五十嵐 健 夫	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	搬送システ ム、ロボッ トの制御方法	-	-	-	
10	特願 2009- 26495 4	特開 2011- 108156	年金不 納によ る抹消	特許 第 5196 445 号	杉浦 裕太, 坂本 大介, 五十嵐 健 夫, 稲見 昌 彦	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	料理プロセ ス指示装置 及び料理プ ロセス指示 方法	-	-	-	1.5.3 (7)

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
11	特願 2010- 42773	特開 2011- 180737	年金不納による抹消	特許第 4997 615号	石井 健太郎, 石田 明彦, グレグソール, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	地図作成方法とロボットの移動経路決定方法	-	-	-	
12	特願 2010- 15900 5	特開 2012- 22457	年金不納による抹消	特許第 5071 873号	橋本 直, リチャードフォン, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	タスク指示システム	-	-	-	
13	特願 2010- 26665 6	特開 2012- 117418	登録(権利有)	特許第 5327 756号	渡邊 恵太, 松田 聖大, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫, 神山 洋一	国立研究開発法人科学技術振興機構	送風システム	-	-	-	1.5.3 (9)
14	特願 2011- 16876	特開 2012- 152521	拒絶査定(1年経過)		濱田 健夫, 坂本 大介, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	マッサージ機器の操作装置	-	-	-	
15	特願 2011- 32547	特開 2012- 171024	登録(権利有)	特許第 5246 672号	橋本 直, 石田 明彦, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	ロボットシステム	-	-	-	1.5.3 (4)
16	特願 2011- 33773	特開 2012- 173062	登録(権利有)	特許第 5640 194号	渡邊 恵太, 松田 聖大, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫, 佐藤 彩夏	国立研究開発法人科学技術振興機構	計量装置及び計量装置の制御方法	-	-	-	1.5.3 (10)
17	特願 2011- 50607	特開 2012- 190073	登録(権利有)	特許第 5488 930号	坂本 大介, リュウ クシ, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	家事計画作成支援装置および家事計画作成支援方法	-	-	-	
18	特願 2011- 10542 1	特開 2014- 143451	未審査請求によるみなし取下		松村 耕平, 坂本 大介, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	ステレオヘッドホン装置	PCT/ JP20 12/0 6191 8	W020 12/1 5378 4	-	

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
19	特願 2011-17159 7	特開 2013-36794	未審査請求によるみなし取下		杉浦 裕太, 笈 豪太, ウィタナ アヌーシャ, リー カリスタ, 坂本 大介, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	柔物体のためのセンサーモジュール及びセンサーシステム	PCT/ JP2012/068353	W02013/021799	-	1.5.3 (12)
20	特願 2011-18249 6	特開 2013-42916	未審査請求によるみなし取下		杉浦 裕太, リー カリスタ, ウィタナ アヌーシャ, 牧野 泰才, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	リング型アクチュエータ	-	-	-	1.5.3 (13)
21	特願 2011-25267 8	特開 2015-26092	未審査請求によるみなし取下		加藤 淳, 坂本 大介, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	人・ロボット間でタスクを共有可能なタスク共有システム	PCT/ JP2012/079828	W02013/073680	-	
22	特願 2011-20333 0	特開 2013-63162	登録(権利有)	特許第 5417400 号	谷口 祥平, 池島 紗知子, 清水 敬輔, 濱田 健夫	パナソニック株式会社	マッサージ機	CN201210297503	CN102988148	CN102988148	
23	特願 2012-15257 0	特開 2014-14436	未審査請求によるみなし取下		森川 大輔, 谷口 祥平, 池島 紗知子, 清水 敬輔, 濱田 健夫	パナソニック株式会社	施療装置用操作器およびこの操作器を有する施療装置	-	-	-	
24	特願 2012-73604	特開 2015-111319	未審査請求によるみなし取下		渡邊 恵太, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	情報入力装置、画面表示方法、及び情報入力プログラム	PCT/ JP2013/059381	W02013/147084	-	
25	特願 2012-81507	特開 2013-208845	未審査請求によるみなし取下		サーカス ダニエル, 小泉 直也, 稲見 昌彦, ラスカー ラメッシュ, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	3次元表面印刷方法	-	-	-	

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
26	特願 2012-14327 7	特開 2014-4233	未審査請求によるみなし取下		清水 敬輔, 谷口 祥平, 池島 紗知子, 森川 大輔, 濱田 健夫, 五十嵐 健夫, 稲見 昌彦	パナソニック株式会社	マッサージ機	-	-	-	
27	特願 2012-18556 5	特開 2014-44080	未審査請求によるみなし取下		杉浦 裕太, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	計測方法、センサモジュール及びセンサシステム	-	-	-	1.5.3 (14)
28	特願 2012-19837 4	特開 2015-215636	未審査請求によるみなし取下		ハビブ カジ ルバイアット, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	テクスチャ描画支援装置	PCT/ JP2013/05029 2	W02014/03821 7	-	1.5.1 (6)
29	特願 2012-24190 7	特開 2014-93147	未審査請求によるみなし取下		橋本 直, 盧承鐸, 山中 太記, 神山洋一, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	照明システムおよび照明制御方法	-	-	-	1.5.3 (11)
30	特願 2012-26264 3	特開 2014-109812	未審査請求によるみなし取下		橋本 直, 鈴木 良平, 神山 洋一, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	光インタフェース装置	-	-	-	
31	特願 2012-26442 2	特開 2014-109935	未審査請求によるみなし取下		五十嵐 健夫	国立研究開発法人科学技術振興機構	3次元モデリング方法および3次元モデリング装置	-	-	-	1.5.1 (2)
32	特願 2014-12069 3	特開 2016-1381	未審査請求によるみなし取下		五十嵐 健夫, 梅谷 信裕, 行, 小山 裕己	国立大学法人 東京大学	情報処理装置、情報処理方法、プログラム及び記録媒体	-	-	-	1.5.2 (7)

終了後

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
1	特願 2015-12362 9	特開 2017-6296	通常審査中		五十嵐 健夫, 金 太一	国立大学法人 東京大学	画像処理装置、画像処理方法、プログラム及び記録媒体	PCT/ JP2016/06797 1	W02016/20424 1	-	2.2.1 (11)

NO	出願番号	公開・公表番号	審査状況	登録番号	発明者名	出願人・権利者名	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外の登録特許	備考
2	特願 2017- 50761 9	再表 2016/1 52356	審査請求無し		三谷 純, 大河内 信弘, 大城 幸雄, 江 健太郎, 林 卓治	国立大学法人 筑波大学, 大日本印刷株式会社	模型、製作システム、情報処理装置、製作方法、情報処理方法、プログラム、記録媒体	PCT/ JP20 16/0 5504 9	W020 16/1 5235 6	-	2.2.2 (7)
3	特願 2017- 52743 1	再表 2017/0 06872	審査請求無し		杉本 麻樹, 正井 克俊, 尾形 正泰, 鈴木 克洋, 中村 文彦, 稲見 昌彦, 杉浦 裕太	学校法人 慶應義塾	顔表情識別システム、顔表情識別方法及び顔表情識別プログラム	PCT/ JP20 16/0 6968 3	W020 17/0 0687 2	-	2.2.3 (6)
4	特願 2017- 55377 3	再表 2017/0 94527	国際公開		五十嵐 健夫, 依田 伸樹	日本電産株式会社, 五十嵐 健夫, 依田 伸樹	動画生成システムおよび動画表示システム	PCT/ JP20 16/0 8422 4	W020 17/0 9452 7	-	2.2.1 (16)

2.1.5 招待講演

プロジェクト終了後の招待講演数は、国際会議(国内で行われた国際会議も含む)が 41 件、国内会議が 110 件の、合計 151 件あった。グループリーダーごとの内訳を以下に示す。

表 2-6 招待講演

グループリーダー	国際会議	国内会議	合計
五十嵐	12	16	28
三谷	17	31	48
稲見	12	63	75
合計	41	110	151

2.2 各研究テーマの進捗状況

本プロジェクト終了後に行われた関連研究や発展研究の概要を研究グループリーダーごとに説明する。

2.2.1 五十嵐グループ

(1) テクスチャベースの Wrinkle Meshes

合成画像の現実感を高める重要な要素であるシワは、コンピュータグラフィックスの研究コミュニティからかなりの注目を集めている。これによく使われる Wrinkle Meshes 法³²は、シミュレーションとレンダリングのために高解像度メッシュが必要であり、CPU およびメモリリソースが厳しく限られているビデオゲーム制作コードでは望ましくない。この問題を解決するために、Silva らはテクスチャベースの Wrinkle Meshes を提案した^[40]。高解像度の制約ベースのシミュレーションのアイデアを活用するが、テクスチャスペースソルバーを使用するように修正し、また、メモリ要求を大幅に低減するシミュレーションデータの符号化を提案した。

(2) ボクセルモデルを自由形式の表面モデルに変換する方法

自由形式の 3 次元表面モデルの構築は未だにむずかしいが、単純なボクセル³³モデルの構築はブロックで構築することができるため比較的簡単である。わかりやすいアプローチは、与えられたボクセルモデルに平滑化（表面フェアリング）を適用することであるが、シャープな境界線を滑らかにしてしまい、結果は必ずしもユーザーにとって望ましいものではない。Nakashima らは、表面モデルの構築を容易にするために、ボクセルモデルを表面モデルに変換する方法を提案した^[41]。ボクセルモデルを最初にいくつかの部分に分割し、各部分に独立にスムージングを適用して、シャープな境界線を維持しつつ滑らかな表面を得ることができる。このプロセスはシンプルなモデルでは約 5 分、複雑なモデルでは約 30 分かかる。この方法はここに示されているような回転形状を有する比較的小規模なボクセルモデル用に設計されている。

³² Müllerand Chentanez が開発した、しわのリアルタイムシミュレーションで、粗い物理シミュレーションによって導かれる制約に基づく方法を適用することによって、細かいメッシュ表面表現にしわを加える。それは実装が簡単で、無条件に安定し、したがってゲームシミュレーションに望ましいフレームワークを提供する。

³³ 体積の要素で、3 次元空間での正規格子単位の値を表す。「体積 (volume)」と「ピクセル (pixel)」を組み合わせた混成語。

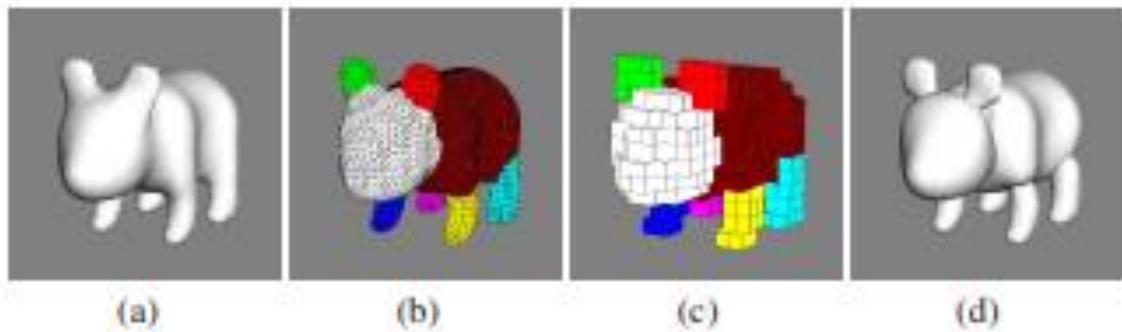


図 2-5^[41] (a) 滑らかなパッチをピース単位でフィッティングして平滑化したサーフェスモデル。(b) メッシュのセグメンテーション、(c) ボクセルモデルの分解、(d) ボクセル部分拡大なしの結果。構成要素間の接合部は不連続性を示す。

(3) スケッチベースでヘアスタイルをより簡単かつ直感的に作成する方法

Seki らは、アーティストが魅力的なヘアスタイルをより簡単かつ直感的に作成することを可能にするスケッチベースの 3 次元ヘアモデルを提示するための方法を提案した^[42]。このシステムでは、スケッチしたヘアスタイルにフィットするように、リグモデル³⁴のリグパラメータを変更してヘアスタイルの輪郭図を表示する。この方法はスケッチからのフロー抽出とそのフローに従うヘアスタイルの作図の 2 つの部分で構成されている。ユーザー調査とプロの 3 次元アーティストとのインタビューによってこの方法は高く評価された。

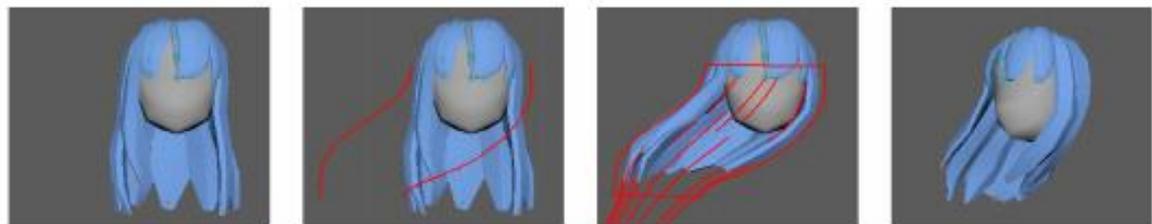


図 2-6^[42] ヘアスタイリングプロセスの概要。(左から順に) オリジナルのリグモデル、ユーザーのインプット (赤線)、変形結果のビュー、別角度からのビュー

(4) 液体シミュレーションのための狭帯域 FLIP 法の拡張

Fluid Implicit Particle 法 (FLIP)³⁵は、パーティクルをグリッドと組み合わせることによって数値的発散を低減する。一方、狭帯域 FLIP 法 (NB-FLIP) は、液体表面付近でのみ FLIP ベースの流体シミュレーションを行い、表面から離れた領域ではグリッドベースの流体シミュレーションを行うことにより、パーティクル数を削減して演算ボトルネック

³⁴ リグ：キャラクターに設定したスケルトン、IK、FK、デフォーメーションなどをアニメーターが直感的に操作できるようにするための仕組みや、インタフェースのこと。リグモデル (rigged model) は、リグ付きモデルをいう。

³⁵ ナビエ・ストークスの方程式の解法を導入した、パーティクルベースの CG 流体シミュレーションのソルバー。最も解が発散しやすいのが、移流 (流体らしい動き) を作り出す工程である。FLIP では、移流以外の工程はグリッドベースで方程式を解き、その結果算出されたグリッドの速度の変化量を、あらかじめグリッド内に仕込んでおいたパーティクルに割り振り、その速度でパーティクルを動かすことによって、ちょうど移流の工程を解いて算出されるような流体らしい動きを作り出す。

を軽減する。Sato らは、NB-FLIP の考え方を拡張し、FLIP 法により計算する領域とグリッドベースで計算する領域を、表面付近だけではなく任意の場所において実行する方式を示した^[43]。このアプローチは、必要な領域にのみパーティクルを集中させることができるため、メモリーと計算量をさらに節約できる。また、本手法では、パーティクルベースとグリッドベースのシミュレーション領域間の流体表面をシームレスに表現することができる。以上のように、本手法は、動きが激しい領域での流体シミュレーションにおいて、パーティクルベースの流体シミュレーションに伴うノイズの多い液体表面生成を避けつつ、FLIP シミュレーションの利点を維持する実用的なアルゴリズムである³⁶。

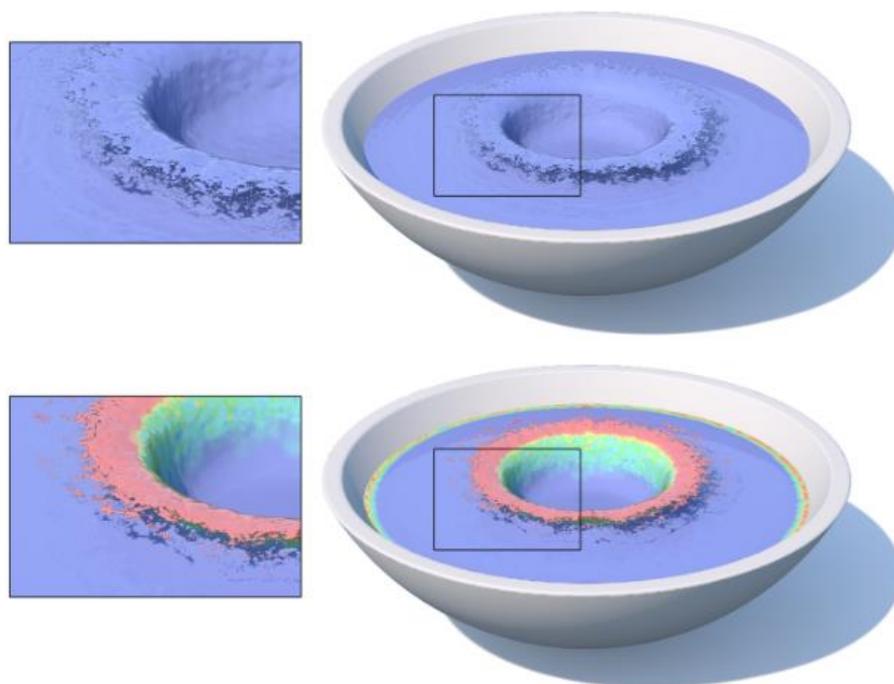


図 2-7^[43] 水滴が水面に落ちてクラウン splash を形成：(上) NB-FLIP 法。複雑な飛沫を表現することができるが、静かな表面はノイズが多い傾向がある。(下) 本法。目に見えないシームレスな領域と動的な領域の両方の望ましい表現を維持することに成功している。

(5) 熟練者による修正を使ったレタッチ処理を自動化するシステム

3次元スキャンの最近の進展により、人間の3次元ジオメトリを取得し3次元プリンタを使用して3次元レプリカを生成することが容易になった。しかし、全身スキャンの設定は、画像解像度が十分でないために顔領域の品質を落としてしまう。この問題を解決するために、アーティストは3次元彫刻ツールを使用して生のスキャンされた全身モデルを修正するが、それには時間と労力がかかる。Noh らは、熟練者による修正結果を任意のターゲット顔モデルに移すことで、レタッチ処理を自動化するシステムを提案した^[44]。この方法はまず2次元顔検出を利用して3次元モデルの目や鼻などの顔の特徴を識別する。各顔パーツについて検出結果を用いて標本とターゲットとの間の密な対応を確立し、次いで転

³⁶ 本手法と NB-FLIP でシミュレーションした作品の比較がビデオで見られる。
<https://www.youtube.com/watch?v=Cy5V09E0zwU>

写をコーティングすることによって標本のジオメトリをターゲットに転送する。この方法はモデルの幾何学的形状だけでなく、3次元印刷されたレプリカも改善することを示した。

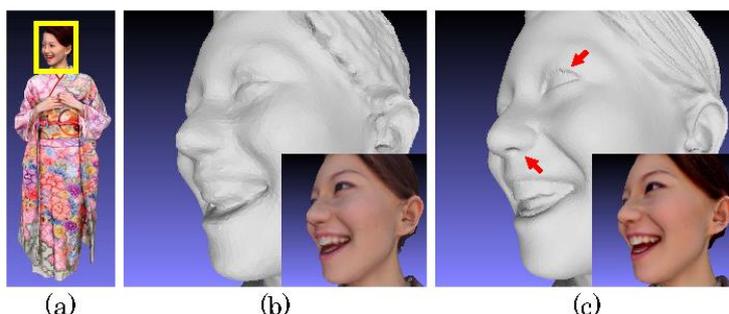


図 2-8^[44] フルボディスキャンされたモデル(a)から粗くスキャンされた3次元ジオメトリ(b)とアーティストが修正したもの(c)の比較。アーティストはテクスチャー情報に従って粗いモデルのローカルジオメトリを改良している。

(6) 自己支持表面を計算するプロセスのどの段階でも、表面ジオメトリ表現としてパラメトリックサーフェスを使用する方法

Mikiらは、自己支持表面を計算する計算プロセスのどの段階でも、表面ジオメトリ表現としてパラメトリック曲面³⁷を使用する方法を提案した^[45]。この方法はAiry応力関数³⁸の理論に基づいている。いくつかの既存の方法もこの理論に基づいているが、離散バージョンを離散的なジオメトリに適用しているのに対し、この手法はこの理論をパラメトリック曲面に直接適用し、離散理論をパラメトリックパッチのエッジに同時に適用する。連続したパッチ間の不連続な境界は、伝統的なアーチ型天井を持つ石造りの建造物に見られるリブに自然に対応する。この研究ではNURBS³⁹曲面を使用した。基本的な考え方は他のパラメトリック曲面にも適用できる。提案した計算スキームによって得られた様々な自己支持表面を提示した。

³⁷ パラメトリック曲面：1組のパラメータ (u, v) に対して点 (x, y, z) が対応する時、 u, v をそれぞれ独立に無限に細かく変化させてできる点の広がりを作る曲面。

³⁸ 2変数に対する双調和関数で、この二階偏微分が平面歪み下にある物体の応力成分を与える。

³⁹ NURBSはNon-Uniform Rational B-Spline (非一様有理Bスプライン)の略で、曲線や曲面を生成するためにコンピュータグラフィックスで一般的に採用される数学的モデルである。大抵の場合、モデルはNURBS曲面1枚では表しきれないので、「パッチ」と呼ばれる何枚かのNURBS曲面をつなぎあわせて継ぎ接ぎをすることになる。

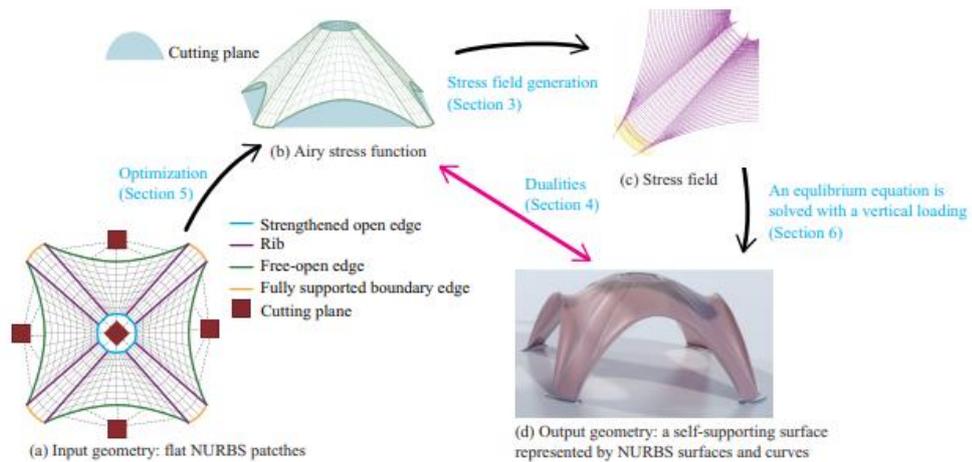


図 2-9^[45] 提案した計算方法の概要

(7) 2 ピース成型をするために物体の分割を作成する対話的技術 (CoreCavity)

金型を使った成型 (molding) により複雑な形状の物体を造るためには、成型技術の物理的制約があるために、たとえばプラモデルのように造形しようとする対象物を成型可能な部品に分解する必要がある、それには専門知識が必要となる。そこで Nakashima らは、2 つの金型の間で成型される 2 ピース成型のための対象物の分解をインタラクティブに行うことのできる技術、「CoreCavity」を提示した^[46]。物体の表面描写が与えられると、まず粗い分解を行い、次いで個々の部品間の境界にアクティブな輪郭モデルを利用して、その薄いシェル相当物を成型可能な部品に分解する。最適化の問題として定式化され、その輪郭の運動は各部品の成型性を保証するための製造上の制約を反映するエネルギーによって導かれる。同時に、ユーザーには美的ガイドラインを行える編集機能が提供される。

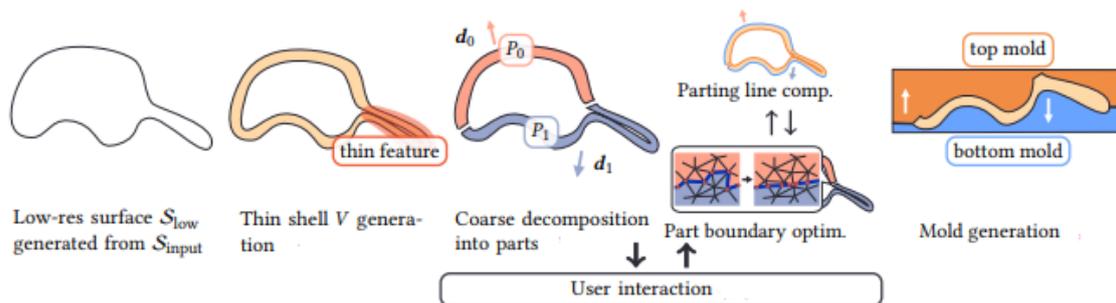


図 2-10^[46] 先ずオフセットされた表面を計算して薄いシェルオブジェクトを取得する (左)。シェルの生成中、薄い形 (赤色) を検出してソリッド (中央左) として作成する。次にシェルオブジェクトがパーツに分割され、分割線とパーツの境界線が最適化される (中央、中央右)。ユーザーインタラクションによってユーザーはデザイン目標を分割に反映できる。最後に金型形状が分割線から生成される (右)。

(8) カスタム化された 3D プリント可能な 2 つの物理的オブジェクトを結合するコネクターの自動作成システム (AutoConnect)

Koyama らは、2 つの物理的な物体を接続するためにカスタマイズされたコネクタを、

3D プリンティングにより自動生成する方法「AutoConnect」を開発した^[47]。ユーザーは接続したい2つのオブジェクトの仮想モデルを単純に配置して方向付けし、重量や寸法などの補助情報を表示する。次に AutoConnect は、ユーザーが 3D プリント用に選択できるいくつかの代替デザインを作成する。コネクターは、各オブジェクトに対して2種類のホルダーを組み合わせることによってデザインする。またホルダーは2つのタイプ、すなわち(1)パイプや板のように規格化された物体、および(2)規格外の自由形式の物体 (free-form objects) に分類する。AutoConnect では物体の幾何学的分析に基づいたシェルグリッパー状のコネクターのデザインをする。



図 2-11^[47] AutoConnect は2つの与えられたオブジェクトとユーザーの指定した形状をベースに 3D プリント可能なカスタマイズされたコネクターを作成する。作例は椅子にマグを取り付けるカスタムホルダー。

(9) 複雑な3次元モデリングプロセスを簡単なタスクの集合体に分解する協調的3次元モデリングシステム

Suzuki らは、複雑な 3 次元モデリングプロセスを簡単なタスクの集合体に分解することによって、マイクロタスク型クラウドソーシングにおける専門家ではないクラウド(crowd)ワーカー⁴⁰が実行可能な簡単なタスクの集合体に分解する、協調的 3 次元モデリングシステムを提案した^[48]。対象物を示す 2 次元画像が与えられると、各クラウドワーカーは視覚認知および現実世界の知識を使用して、対象物の正射投影図を表す簡単なスケッチを描くように指示される。次いで、一連のアルゴリズムが収集されたスケッチの集合から得られた幾何情報を統合することによって 3 次元モデルを合成し、多くの誤りや矛盾を含む不完全なスケッチの集合から、クリーンな線図と 3 次元モデルを生成する。このシステムを用いると、数時間内に様々な物体の適切な品質の 3 次元形状を生成することができる。本研究は 2017 年 Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウムにおいて、優秀研究発表賞を受賞した。

⁴⁰ クラウドソーシング (crowdsourcing) を通じて業務を受注し勤務する労働者を指す。クラウドソーシングはウェブ上の仲介サービスを通じて行われる、業務単位のアウトソーシングである。

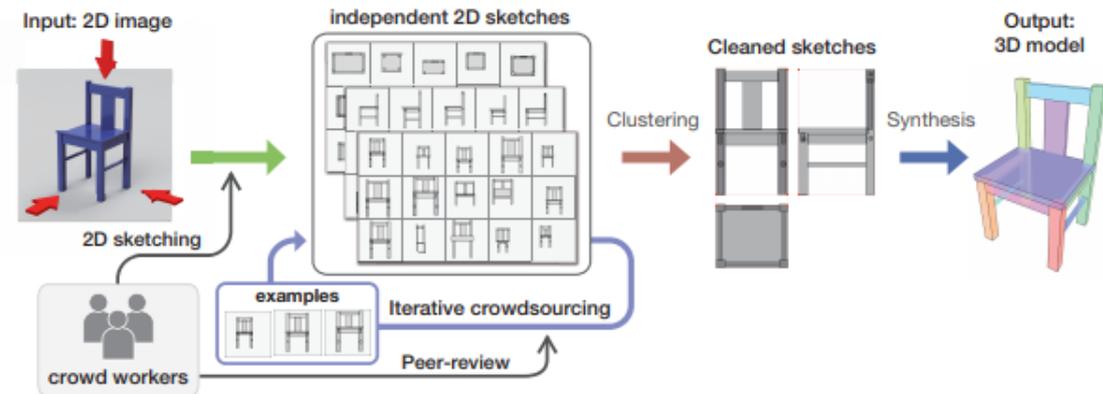


図 2-12^[48] 各クラウドワーカーは参照画像の正投影を表すスケッチを描画する。提案されたクラウドソーシングのワークフローは、ピアレビューを利用することにより、提出品質を繰り返し改善する。集められたスケッチはシステムによってクリーンなマルチビュー投影に統合され、最終的な 3 次元モデルを生成する。

(10) Shape Matching Dynamics (SMD) 法を使用した心拍動の視覚シミュレーション

Shape Matching Dynamics (SMD) 法は、幾何学的制約に基づく堅牢で効率的な弾性計算手法である。井尻らは、心拍動の視覚シミュレーションに SMD を用いた研究を行った^[49]。本研究では、心臓は四面体メッシュモデルによって表され、隣接するメッシュの各頂点に局所領域を定義する。シミュレーション中では、最初に、所定の心筋繊維走行および収縮率に応じてすべての局所領域を収縮させる。次に、SMD を用いて収縮した局所領域を満たすように心臓モデルの全体形状を計算する。ここでは心筋の異方性剛性をエミュレートするために、筋繊維走行を考慮した重み関数を導入している。この技術は SMD に基づいているので、市販の PC で心臓の動きをリアルタイムで計算することが可能である。本研究は 2012 年に、経済産業省 Innovative Technologies 特別賞を受賞した。

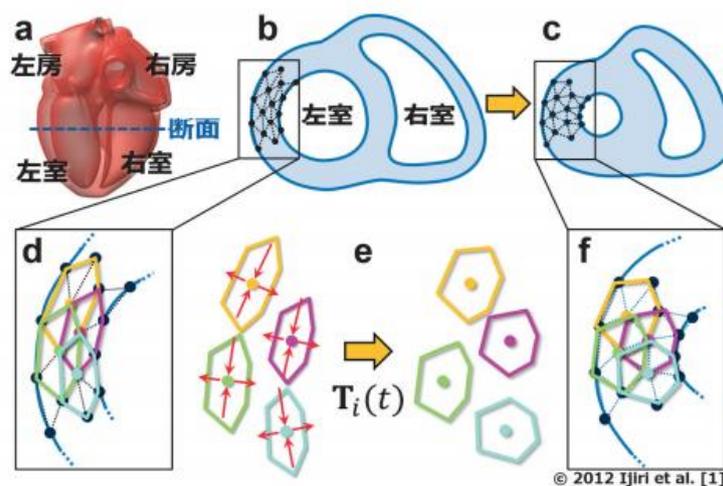


図 2-13^[49] 心臓モデル(a)の各頂点において局所領域を定義し(b、d)、各領域を収縮変形させる(e)。続いて収縮した局所領域形状をなるべく満足するようモデル全体を変形する (e、f)。

(11) 医用ボリュームデータのセグメンテーションとアイソサーフェス抽出のインタラクティブな方法

医用ボリュームデータのセグメンテーションとアイソサーフェス（等値面）の抽出は、CTやMRI などから得られる3次元ボリュームデータから臓器のような特定の領域を抽出するためのプロセスである。従来の抽出方法では、ユーザーがボリュームを複数の領域に繰り返し分解し、閾値を使用して各領域を分割し、その後各領域における不要な部分を手作業で取り除く作業を行う。しかしこれには時間がかかり、異なるカメラビューから多くのマウス操作を必要とする。Igarashi らは、ユーザーがペイントシステムで一般的に見られるフラッドフィルやブラシなどのツールを使用して、目的とするボリュームを単に色付けすることによりセグメンテーションが可能になるインタラクティブな方法を提案した^[50]。これにより、マウスとカメラの制御操作が大幅に削減される。この方法の特徴は、個々のボクセルに対して空間的に変化する複数の閾値を割り当てる閾値フィールドを導入したことである。これにより領域へのボリュームの離散分解と、ある一定の閾値を用いた各領域のセグメンテーションを一般的に表現することができるため、より柔軟で効率的なワークフローが提供される。ユーザー調査の結果、提案された方法が従来の方法より数倍高速であることを示し、ターゲットユーザーの神経外科医は、提案された方法が非常に新規であり有用なので、毎日の実践においてそれを使用したいという強い希望を表明した。

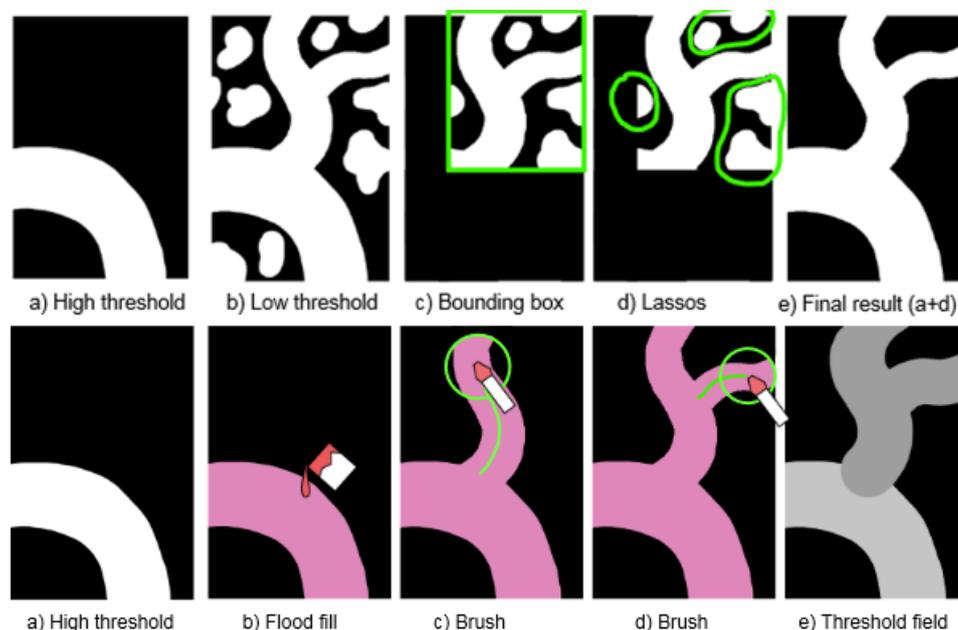


図 2-14^[50] (上)従来のボリュームセグメンテーションのワークフロー(囲みボックスや投げ縄は複数のカメラビューからの操作が必要)、(下)提案手法によるボリュームセグメンテーション(これは単一のカメラビューで実行できる)

(12) 心臓のような複雑な器官モデルのインタラクティブな変形と、与えられた医用画像から自動的にデータ構造を構築する技術

Nakashima らは、心臓のような複雑な器官モデルのインタラクティブな変形のためのデ

ータ構造と、与えられた医用画像から自動的にデータ構造を構築する技術を提案した^[51]。データ構造は弾性シミュレーションのためのグラフ構造と、視覚化のための表面メッシュからなる二重モデルである。システムはスキニング技術を用いてシミュレーション結果をメッシュにマッピングする。まず、入力された医用画像から高密度グラフとメッシュを生成し、次にそれを別々に縮小する。最後に、システムは縮小プロセスをバックトラッキングすることによって、縮小されたグラフとメッシュとの間の対応関係を確立する。



図 2-15^[51] ブラウザーアプリケーションでユーザーは、マルチタッチインタラクションを通して心臓モデルを変形したりカットしたりすることができる。

(13) テクスチャ品質とメモリ使用のトレードオフを改善するための方法

2次元ゲームグラフィックスでは、効果的なレンダリングを実現するために、テクスチャがスプライトシートと呼ばれる単一のテクスチャにパックされている。スプライトシートはメモリを節約するために、ブロックベースの圧縮や16bpp⁴¹のトーンリダクションなど、さまざまな圧縮方式を使用して圧縮されており、いくつかの問題を提示している。Yodaらは、2次元スプライトでのテクスチャ品質とメモリ使用のトレードオフを改善するために、アルファ分解と呼ばれる新しい手法を提案した^[52]。アーティストは最初に32bppテクスチャをアルファで2つの16bppテクスチャに分解し、通常の16bppテクスチャと一緒に1つのスプライトシートにパックする。レンダリング時に、2つの分解された16bppテクスチャは単純にレイヤー化され、アルファブレンド⁴²され、ソース32bppを可能な限り忠実に再現する(図2-16)。



⁴¹ ビット/ピクセル

⁴² 2つの画像を係数(α 値)により合成すること。特に映像表現やゲームの開発などに必須の技術で、例えば別々に描かれた背景とキャラクターとを合成するのに使われる。文字などのアンチエイリアスにも使われている。

図 2-16^[52] (a) 本手法の概要。(b, c) 通常の 16bpp スプライトシートとそのレンダリング結果はノイズが含まれている。(d, e) 選択的にアルファ分解されたテクスチャーとそのレンダリング結果はノイズが減少している。

(14) 録画映像の音声トラックへの高周波信号に変換した注釈情報埋め込みによるビデオ編集支援 (AnnoTone)

Suzuki らは、ビデオカメラの地理的位置や俳優のパフォーマンスの質など、シーンの情報を記述する注釈を録画中に埋め込むことにより、クロッピングやエフェクトの生成などのビデオ編集プロセスをサポートするビデオ注釈システム「AnnoTone」を提案した^[53]。このシステムは、入力された注釈データを人間の耳に聞こえにくい高周波の音声信号に変換し、ビデオカメラの近くに配置されたスマートフォンスピーカーから送出し、映像とともにビデオカメラに記録する。このスキームによって、スマートフォン以外の特定の機器を必要とせずに、標準ビデオカメラを使用して注釈を追加することが可能となる。録画後、埋め込まれた注釈はビデオファイルから抽出して、ビデオ編集をサポートするために利用する。本提案システムの性能評価を行った結果、適切な注釈信号除去を行うことによって、映像作品の品質を損ねることなく映像編集における注釈情報の使用が可能であることが検証できた。本研究は、2015 年の The ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2015)において BestPaper Honorable Mention を受賞した。

Workflow Overview

- Extract embedded annotation from audio track
- Remove annotation signals after editing

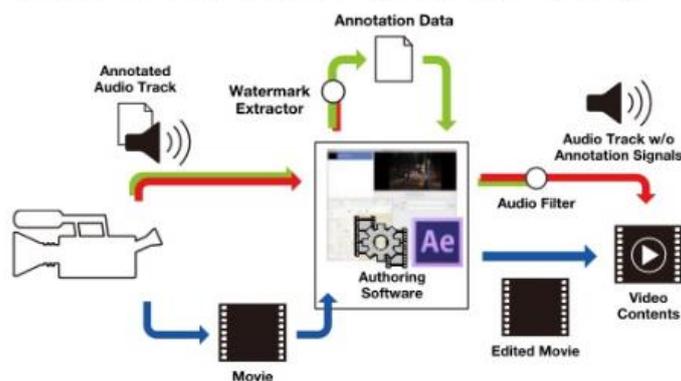


図 2-17^[53] AnnoTone のワークフロー

(15) ビデオサウンドをアニメーションのサウンドワードに自動的に変換し、サウンドオブジェクトの近くに配置する方法

テキストキャプションは、サウンドにアクセスできない場合にビデオにサウンド情報を提供する重要な手段である。しかし、従来のテキストキャプションは音声の音を視覚化するように設計されているので、非言語の音声に対しては全く表現できない。この問題に対

処するために Wang らは非言語のビデオサウンドをアニメーションのサウンドワードに自動的に変換し、ビジュアライゼーションのためにビデオのサウンドオブジェクトの近くに配置する方法を提案した^[54]。オンラインクラウドソーシングサービスを利用して 300 人以上の参加者を持つユーザー調査を実施した結果、アニメーション音声単語は音源の位置を明確にしながらかつ自然に音のダイナミクスを視覚化できるだけでなく、ビデオをより楽しく見せるようにし、ビデオの視覚的効果を高めることにも貢献していることを確認した。

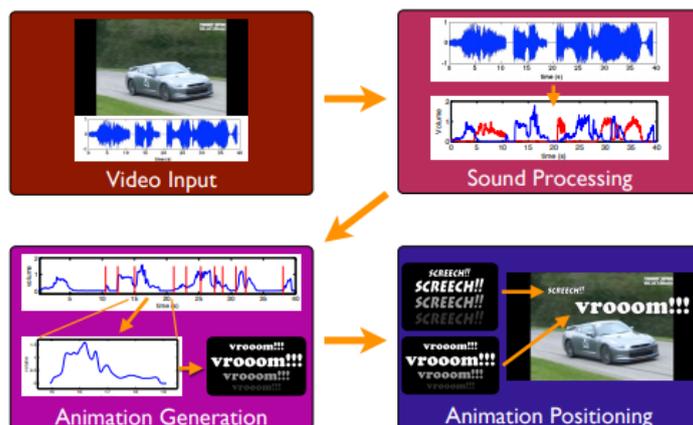


図 2-18^[54] 提案アルゴリズムの概要。処理フローは、1) サウンド処理、2) アニメーション生成、3) アニメーションポジショニングの 3 つからなる。

(16) 2 つの入力画像の間に連続中間フレームのシーケンスを生成する方法

Fan らは、2 つの入力画像の間に連続する中間フレームのシリーズを作成することができる、画像シーケンス補間法を提案した^[55]。この方法は、画像内の動き情報を記述するパスフレームワークに基づいている。1 つの入力画像から始まり別の入力画像で終わる経路は、画像内の各画素について構築される。本研究の主な貢献は、特徴点を考慮に入れたことである。特徴点のうちの位置ずれを算出することにより、経路最適化の処理に情報とガイダンスを与えることができ、補間結果をより妥当で自然なものとする事ができる。また、最適化処理の条件や制約を増やしたので、時間とメモリのコストを効果的に削減できる。



図 2-19^[55] 本研究のアルゴリズムによる 2 つの入力画像の間に生成された滑らかな中間フレーム

ーム。左上および右下は2つの入力画像で、残りの赤線で囲まれた8つの画像は合成された中間フレーム。

(17) 写真編集履歴を基に好みを非明示的かつ漸進的に学習する色強調法 (SelPh)

色調編集は写真編集の非常に重要な側面である。写真家が何十枚、何百枚もの写真を撮っている場合でも、明るさやコントラストなどをソフトウェアのスライダーを手動で微調整し、1枚1枚写真を調整する必要がある。この反復的な手作業をサポートするために、Koyama らはユーザーの写真編集履歴から非明示的かつ漸進的にユーザーの好みを学習するシステムである自己強化していく色調編集環境 (self-reinforcing color enhancement) 「SelPh」を提案した^[56]。写真家にSelPhを使って写真の色調編集を行ってもらった結果、彼らはSelPhの色調編集にとっても満足し、従来の編集作業よりよいと考えていることがわかった。本研究は2015年に、情報処理学会グラフィクスとCAD研究会において優秀研究発表賞 (GCAD 賞)を受賞した。

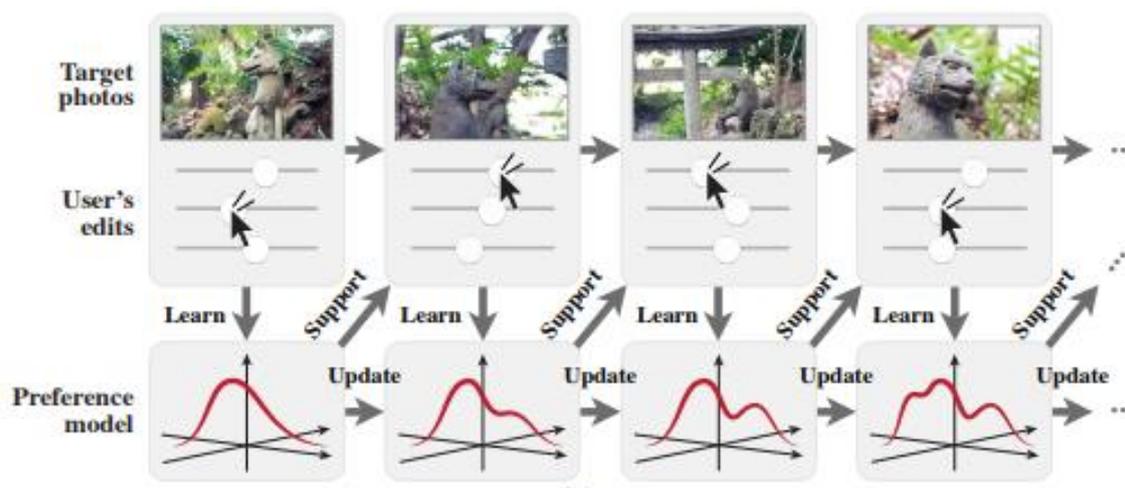


図 2-20^[56] 自己強化していく色調編集のコンセプト: より多くの色調編集を行うにつれて、システムは非明示的かつ斬新的にユーザーの好みを学習し、より効果的にユーザーを支援することが可能になる。

(18) 圧力の時間的変化を使用した流体アニメーションのための新しい移流スキーム

Sato らは、流体アニメーションのための新しい移流スキームを開発した^[57]。本研究では、一般的に使われているセミラグランジュ法のスキームを拡張して、圧力の長期的な時間的変化を考慮する。この結果、時間の経過に伴う圧力勾配を組み込むことによって、数値発散を効果的に最小限に抑える新しい方程式と、グリッドとトレーサ粒子間の補間によって引き起こされる問題に対処するための新しいエラー訂正方式からなる、延長したセミラグランジュのバックトラッキングのための空間適応型スキームを提案した。この方法は、計算コストやメモリーコストが増加しても、品質のトレードオフを可能にする精度の直感的な制御ができ、実装と並列化が容易である。また、微小な渦を消滅させることなく、運動

エネルギーの保存においても従来法を上回る。

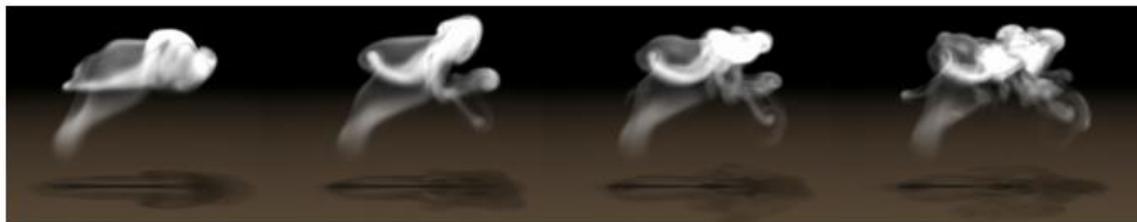


図 2-21^[57] 煙のシミュレーション。左から右へ、セミラグランジュ法による移流、本法で時間をさかのぼるステップ数 N をそれぞれ 4、8、16 とした場合の移流で、順に解像度が上がっている。

(19) スマートフォンなどで撮った写真から樹木をモデル化し、アニメーション化する低コストアプローチ

木のコンピュータアニメーションは、映画制作、ビデオゲーム、バーチャルリアリティの分野で幅広く使用されている。物理学をベースとした方法は、木の動きの良好な近似を達成するが、現実世界の特定の木を現実的にアニメーション化することには、測定が困難な動的特性に依存するため依然として課題が残っている。Hu らは、スマートフォンやハンドヘルドカメラを使用してキャプチャできる写真やビデオから屋外の樹木をモデル化し、アニメーション化するための低コストのインタラクティブなアプローチを提案した^[58]。枝と葉の動きを追跡するために、誤って追跡した特徴をユーザーが対話的に修正することを可能にする半自動追跡方法が提示される。その後、高速フーリエ変換を用いて枝や葉の物理パラメータを推定し、これらの性質を単純な物理モデルに適用して、様々な外力の木のアニメーションを生成する。

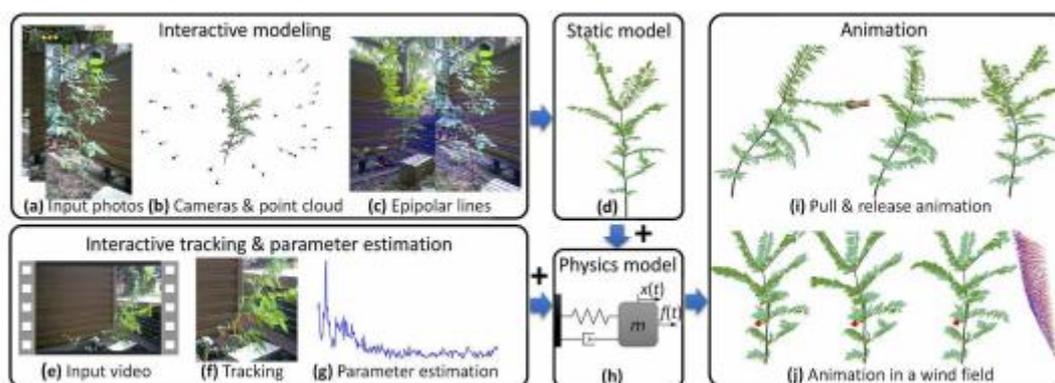


図 2-22^[58] 写真とビデオからの樹木モデリングとアニメーションのワークフロー

(20) 視覚デザイン探索のためのクラウドソーシングを活用したパラメータ空間解析

パラメータ調整は、さまざまなデザインシナリオで一般的な作業である。たとえば、写真の色補正では、デザイナーは最高の視覚的印象を得るために、明るさやコントラストなどの複数のパラメータを微調整する。1つのパラメータを調整するのは簡単だが、関連パラメータが複数ある場合、タスクははるかに複雑になり、多くの試行と大きな認知負荷が

必要になる。Koyama らはこの問題に対処するために、ベイジアン最適化⁴³手法を拡張し、システムがパラメータ調整のタスク全体を、単一のスライダを操作することによって実行するのが容易な、一次元ラインサーチクエリのシーケンスに分解する方法を提案した^[59]。さらに、クラウドワーカー⁴⁴に問い合わせる“crowd-powered visual design optimizer”と呼ぶ新しい概念を提示し、その実用的な実装を行った。このクラウドソーシング用のシングルスライダー操作マイクロタスク⁴⁵デザインは、既存の比較ベースのマイクロタスク設計と比べて最適化の収束が著しく早い。フレームワークを2つの異なるデザイン領域、すなわち写真の色補正と素材の BRDF⁴⁶デザインに適用し、さまざまなデザイン領域への適用性を示した。引用論文は2017年に出版されたが、本研究の一部は2014年に22nd Workshop on Interactive Systems and Software(WISS 2014)において発表され優秀論文賞を、2016年に情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会において優秀研究発表賞 (CGVI 賞)、および画像電子学会 Visual Computing 研究会において Visual Computing 研究賞を、2018年には日本ソフトウェア科学会において研究論文賞を受賞している。

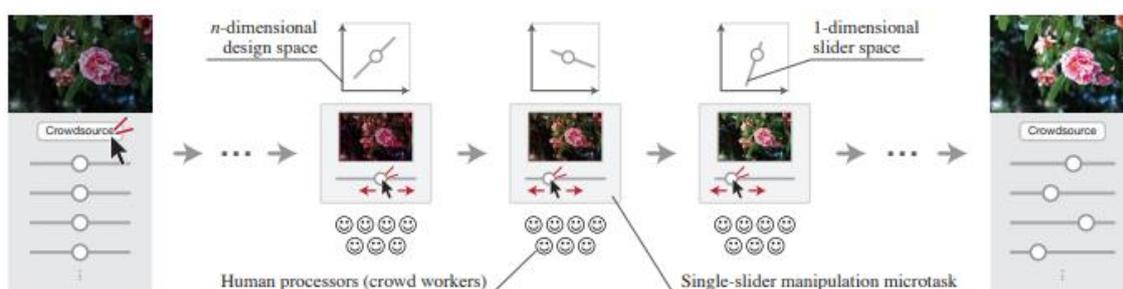


図 2-23A^[59] 本手法の概念図

⁴³ Bayesian Optimization : 有力な Black-box 関数最適化手法の 1 つであり、評価に大きな計算コストのかかる目的関数の代わりに、Acquisition function と呼ばれる代理関数を最適化することで、次の探索点を選択する。

⁴⁴ クラウドソーシング (crowdsourcing) を通じて業務を受注し勤務する労働者を指す。クラウドソーシングはウェブ上の仲介サービスを通じて行われる、業務単位のアウトソーシングである。

⁴⁵ マイクロタスク : 誰でもできるような非常に簡単な作業による成果物を提出する仕事を対象とするクラウドソーシングの形式を言う。

⁴⁶ 双方向反射率分布関数(Bidirectional Reflectance Distribution Function) : 光の反射モデルの一つで、反射表面上のある地点に対してある方向から光が入射したとき、それぞれの方向へどれだけの光が反射されるかを表す反射地点に固有の関数。反射率を一般化したものと言える。



図 2-23B^[59] マイクロタスク：(左) 既存の方法はペアワイズ (1 対ごとの) 比較を行うマイクロタスク。(右) 本手法では、シングルスライダーの操作だけのマイクロタスク。

(21) 2 つの視点から空間の設計を同時に議論ができる共同設計システム (Dollhouse)

Ibayashi らは、2 種類の異なる視点を持つユーザー同士が自然なコミュニケーションをとりながら空間デザインを行うことが可能なシステム「Dollhouse」を開発した^[60]。これは、複数の設計者がマルチタッチパネルで操作して、俯瞰視点から壁や家具などの空間のレイアウトを変更できる「空間レイアウトインターフェース」と、利用者が頭部搭載型ディスプレイを用いてレイアウトされたバーチャルリアリティ空間に没入し、一人称視点で空間レイアウトを体感できる「没入型インタフェース」からなる。従来の設計支援システムでは設計とバーチャル空間没入が別々であったため、同時に設計の「操作」と空間の「体感」を行えなかったが、設計者と空間に没入した利用者（体感者）のコミュニケーションを支援する機能を備えており、操作と体感が同時に行えるため、設計者と利用者がリアルタイムで協調できる。設計者が現場の利用者の意見をその場でレイアウトに反映でき、住宅や商業施設などの大規模建築物の空間設計の工程を短縮できる。また、がんこフードサービス株式会社と連携した実証実験により、開発したシステムの有用性を実証した。本研究は、2016 年の情報処理学会においてインタラクティブ発表賞を受賞した。



Dollhouse VRのシステム概要
図 2-24^[47] システムの概要

⁴⁷ <http://www-ui.is.s.u-tokyo.ac.jp/projects/dollhousevr/>から引用。

(22) チョップスティックと糊の複合材料およびプロジェクションマッピングによるガイダンスシステムを用いた大型建造物の製造

最近のデジタルファブリケーションツールは、パーソナライズされたラピッドプロトタイプリングへのアクセスを可能にした。しかしながら、そのようなツールは製品規模のオブジェクトに限定されている。Yoshida らは、アーキテクチャ規模のオブジェクトをプリントするための新しい手法を提案した^[61]。これには、(i) 費用効果が高く環境的に持続可能なチョップスティックとボンドで構成される建設資材、(ii) チョップスティックとボンドの複合材料の一貫した供給を可能にするハンドヘルドチョップスティックディスペンサー、(iii) デプスカメラとプロジェクタで構成された投影マッピングを使用するプリントガイダンスシステムの3つの開発が含まれる。このプリントガイダンスシステムは、リアルタイムで所定の形状を評価し、建設中のフォームに単純なカラーコードを投影することによって、人がチョップスティックを置くべき場所を示す。提案された方法のケーススタディとして実験パビリオンを設計し、足場やフォームワークなしで構築した。

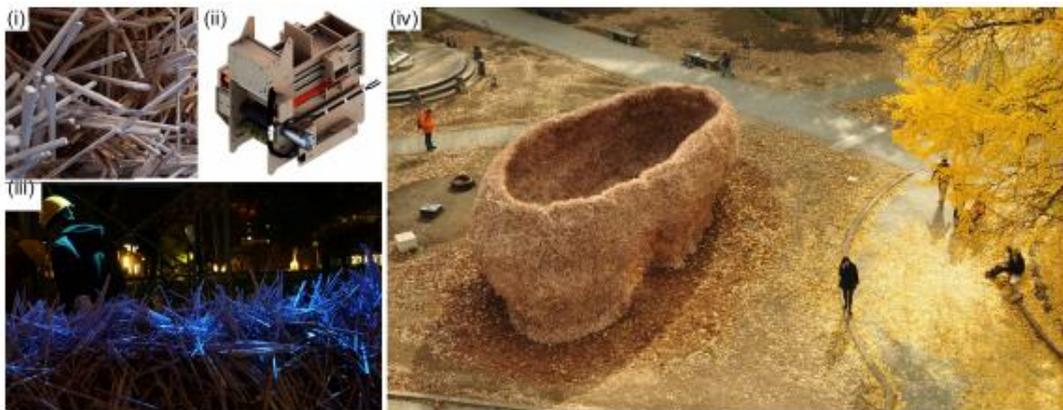


図 2-25A^[61] (i) 木工用ボンドで固められたプリントされたチョップスティックの凝集、(ii) チョップスティック-ボンドコンポジットを一貫して供給するために特別に開発されたハンドヘルドプリント装置、(iii) マッピングされたチョップスティック凝集体(仕組みは図 2-25B 参照)、(iv) ケーススタディとして構築されたパビリオン。(このパビリオンの上部はその後、パネルとして別々に構築され組み立てられた。)

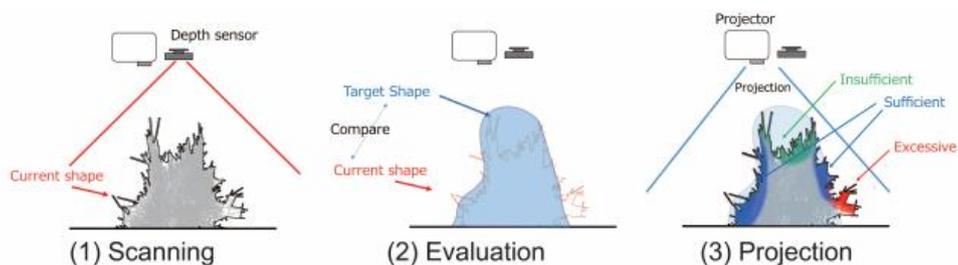


図 2-25B^[61] ガイダンスシステムのワークフロー

(23) 人間と機械の役割や相互作用を再分配してハイブリッド化された建築方法

建築現場では、計算ツールやロボットがますます高度化し、人はそれによる生産の完成

度とスピードに追い付くことはない。人が行う仕事は一般に魅力的ではなく、必ずしも熟練労働力を必要とせず、デジタル時代の職人の役割に疑問を呈している。López らは、計算ツールをサポート手段として使用しつつ、設計ツールと製造プロセスにおける人間の適応性と傾向を活用することを提案した^[62]。このシステムは、(i) 人の動作をスキャンして、現場における位置決めを指示するアプリケーション、(ii) 軽量で速乾押し出し複合材料、(iii) ハンドヘルドのスマートツール、および (iv) インタラクティブなフィードバックシステムによる構造最適化からなる。人の作業による誤差をデジタル化して構造最適化をくり返すことで、目標形状自体を徐々に変化させる。このハイブリッド化された方法は、人間と機械の役割や相互作用を再分配することによって、計算ツールによってもたらされる精度と最適化能力を最大限に引き出しながら、人間の本質的に直観的ではあるが不正確な性質を利用し、これまでは“human error”とみなされていた人間味を、ダイナミックに魅力的で進化する設計と製造プロセスに組み込む。



図 2-26^[62] ケーススタディの結果建設されたパビリオン

(24) 自由形状の竹とんぼを簡単に設計するためのインタラクティブなデザインシステム

Nakamura らは、非対称な形状も含めて自由な形状であり、かつ安定して飛行させることができる竹とんぼを初心者でも容易に設計することができる、インタラクティブな設計システムを提案した^[63]。このシステムは、設計活動を容易にするための2つの有用な機能を提供する。まず、ユーザーが編集中の現在の竹とんぼデザインのシミュレートされた飛行軌道をリアルタイムで視覚化する。次に、スピン品質（安定したスピンの安定性）と飛行品質（どのくらい高く長く飛ぶか）が向上するように、現在の竹とんぼのデザインを自動的に微調整する最適化機能を提供する。設計された竹とんぼは、レーザーカッターのようなデジタル製作設備を使用して製造することができる。本研究は、2016年の24th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2016)においてインタラクティブ発表賞(参加者投票)を受賞した。

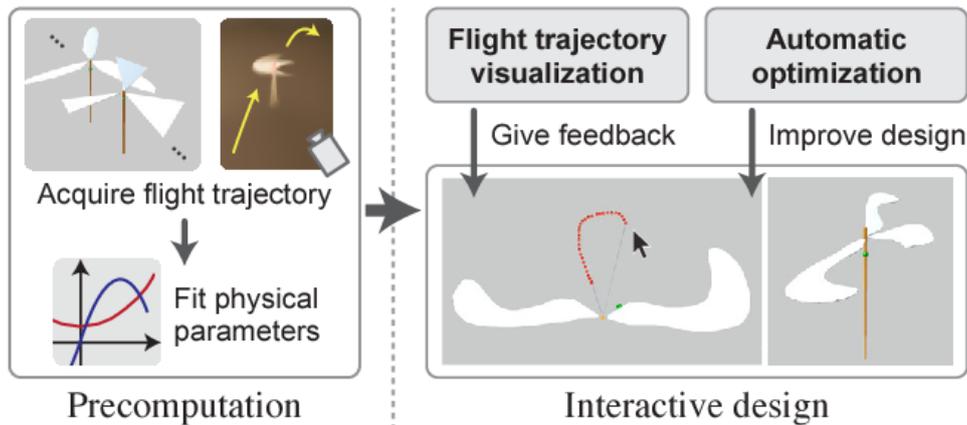


図 2-27^[63] まず、飛行軌道を取得するために多くの竹とんぼを製作して飛行させ、取得したデータを使用して、シミュレーションと最適化に必要な物理的パラメーターを合わせる。インタラクティブデザインセッションでは擬似飛行軌道などの情報を視覚化し、また、自動最適化機能を提供することによりフリーフォーム飛行が可能な竹とんぼを設計することができる。

(25) ポテンシャル流における 3 次元形状の効率的で多様な数値空力モデル

Xie らは、ポテンシャル流における一般的な 3 次元形状の効率的で多様な数値空力モデルを提案した^[64]。このモデルは計算コストが低く、与えられたグライダー形状の空力負荷に対して適度な忠実度の精度を達成する。さらに、空気力学的力およびモーメントのための新しい 2 次方程式を提案した。これは幾何学的に依存する空気力学的係数行列から成り、抗力/揚力係数の連続表現を有する。このモデルはインタラクティブなアニメーションのための一般的な剛体シミュレータと組み合わせた、自然でリアルタイムの空気力学シミュレーションを可能にする。また、オリジナルのグライダーのためのデザインシステムも開発した。これはアセンブリベースのモデリングインタフェースを使用し、本手法で有効になった部分的な事前計算を活用して対話型のフィードバックを実現する。このシステムを使ってさまざまな飛行可能なグライダーを簡単に設計できることを示した。

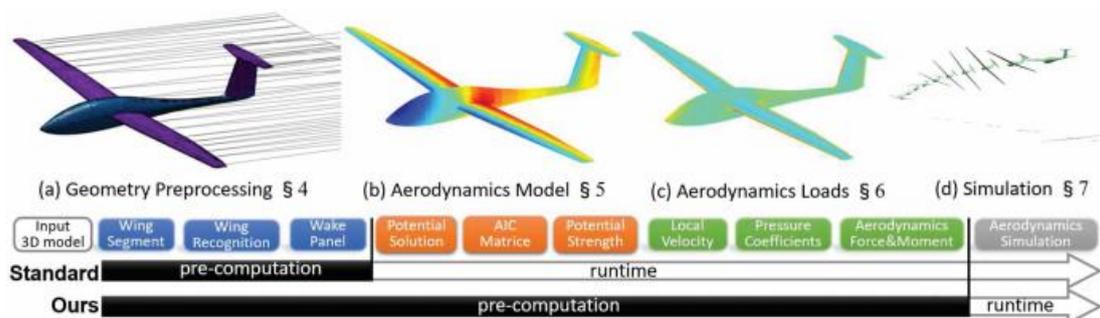


図 2-28^[64] 提案された空気力学モデルの概要。標準空気力学モデルとは対照的に、このモデルは、(a) 幾何学的事前計算プロセス、(b) 空気力学モデル、および (c) 空力負荷により、計算コストを数桁減少させる。実行時にはダイナミクスシミュレーションのみが実行される。

(26) ユーザー満足度を向上させるインタラクティブなセルフポートレートアプリケーション

スマートフォンでセルフポートレート（自分撮り）を撮ることは人気があり普及しているが、セルフポートレートをうまく使えないユーザーにとっては時間がかかり面倒な作業で、優れたセルフポートレートを撮ることは困難である。Fang らは、優れたセルフポートレートを撮ることの難しさを軽減し、ユーザーの満足度を向上させるためのインタラクティブなセルフポートレートアプリケーションを提案した^[65]。このシステムは、良いセルフポートレートを達成するための適切な頭の姿勢に関して視覚と音声ガイダンスインターフェースを提供して、平均的なユーザーがセルフポートレートを撮るのを助ける。クラウドソーシングベースの学習による前処理を、数百の仮想セルフポートレートからの可能な頭部姿勢のスコア空間を評価するために利用する。対話型アプリケーションでは、ユーザーの現在の頭部姿勢を推定する幾何学的手法を採用した。

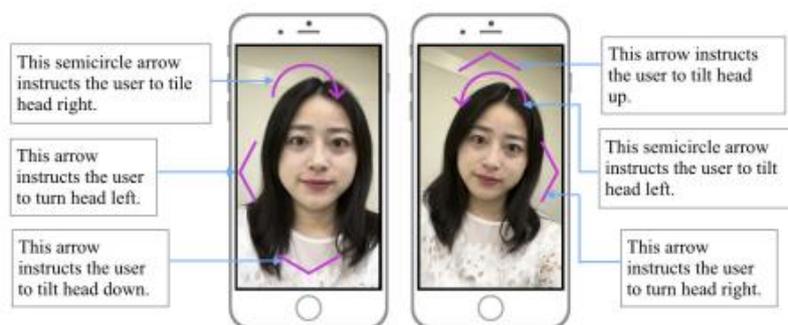


図 2-29^[65] ビジュアルユーザーインターフェース

(27) 靴下に設置した圧力センサーを使用した足ベースのジェスチャーによるデバイスの制御(足裏ジェスチャー)

Fukahori らは、靴下型の圧力センサーを用い微小な足ジェスチャーを利用した、「足裏 (foot plantar-based: FPB) ジェスチャー」と名付けた入力方法を提案した^[66]。このシステムではつま先で床を押すなどの動作で足裏の圧力分布を変えることによって、コンピューティングデバイスを操作することができる。このような足の動きは目立たないので、混雑した電車などの公共の場での使用に適している。本研究ではまずユーザーに、コンピューティングデバイスを制御するための特定のコマンドに適切なジェスチャーが何であるかを尋ねる推測可能性調査を行い、次に機械学習技術を用いたジェスチャー認識器を実装した。足裏ジェスチャーの誤認識を避けるために、歩行などの日常活動中に足裏の圧力パターンを、負のトレーニングデータとして収集した。足裏ジェスチャーの識別率は 91.3%であり、日常動作と足裏ジェスチャーの識別率は 99.4%であった。

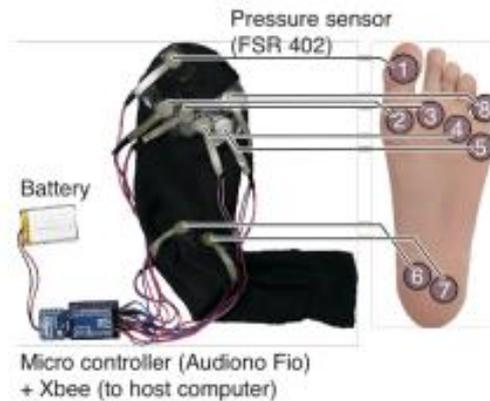


図 2-30^[66] 足裏ジェスチャーを検知するための靴下型圧力センサーSockswitch システム
 (左) Sockswitch システムの構成、(右) 足裏の圧力センサーの位置

(28) 自動運転の車と歩行者との間のコミュニケーションのためのインタフェース (Eyes on a Car)

近年自動運転技術がますます開発されテストされているが、自動運転の車と歩行者との間のコミュニケーションには、これまでに限られた数の研究しか行われていない。例えば、歩行者が通りを横切ると、その歩行者は接近する自動運転車の意図を知る必要がある。Chang らは、車と歩行者との間の視覚的なコミュニケーションを確立するために、車に目を取り付けた「Eyes on a Car」と呼ばれる新しいインタフェースを提案した^[67]。車は停止する意思を示すために歩行者をその目で見ると、この新しいインタフェースは、道路横断のシナリオを表す仮想現実シミュレートされた環境によって評価された。その結果、接近する車がこの「目」を有する場合、通常の場合よりも歩行者は正しい道路横断の決定をより迅速に行うことができ、さらに、歩行者は接近する車の目が彼らを見ていると、道路を横切ることに関してより安全と感ずることが示された。

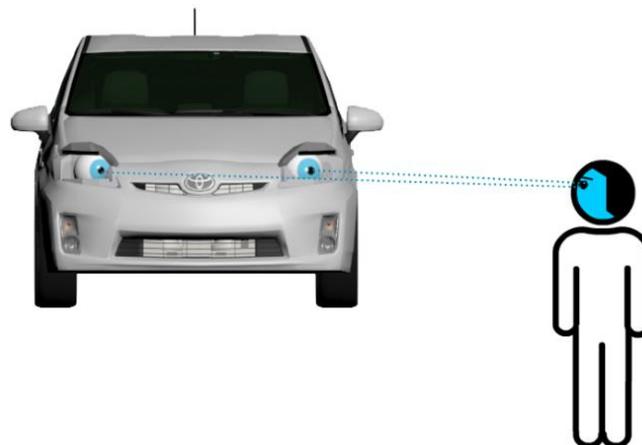


図 2-31^[67] 車と歩行者間のアイコンタクトの概念

(29) 異方性反射の性質を利用して草地に画像を表示する描画方法 (Grassffiti)

Sugiura らは、本プロジェクトの期間中に開発した「Graffiti Fur」⁴⁸の原理を応用して、芝生の上に広面積の絵を描画する手法を提案した^[68]。芝生は異方性を持つため、芝の毛の角度に応じて光の反射が変化する。この現象を利用するとあたかも芝生に濃淡が生じているように人間は知覚できる。そこで芝の毛の方向の角度を変えるローラー型の描画装置を開発し、これを用いてデザインした絵や文字を描画した。パブリックスペースにおいてデモンストレーションを行い、多くの来場者にシステムを体験してもらった。本研究は、2016年に 24th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2016)においてインタラクティブ発表賞を受賞した。



図 2-32⁴⁹ Grassffiti で描かれた絵

2.2.2 三谷グループ

(1) エアスプレーのようなインタフェースを有する拡張現実 3次元モデリングシステム

3次元プリンタはCADまたは3次元グラフィックスシステムで設計された形状を出力する手段として普及してきたが、標準的な3次元ソフトウェアのユーザーインタフェースは複雑であり、さらに3次元グラフィックスソフトウェアで設計されたモデルでは幾何学的な問題があり、3次元プリンタで出力できないことがよくある。Aoki らは、エアスプレーを模したインタフェースを持つ新規なAR（拡張現実）3次元モデリングシステムと、デザインした形状を完全に造形することができる新しいデータ構造（オクテットボクセル）を提案した^[69]。オクテットボクセルによるデータ構造は、正多面体のような対称性を持つ幾何学的な物体のデザインに適している。ユーザーテストにより、簡単なユーザーインタフェースを使用して短時間で、ユーザーが自分の装飾品を直感的にデザインできることを確認した。

⁴⁸ 被毛を有する布の逆毛の部分とそうでない部分における光の反射特性がそれぞれ異なる現象を利用して、被毛布を情報提示ディスプレイとして活用する技術。

⁴⁹ 映像情報メディア学会誌 Vol. 71、No. 11 (2017)から引用した。

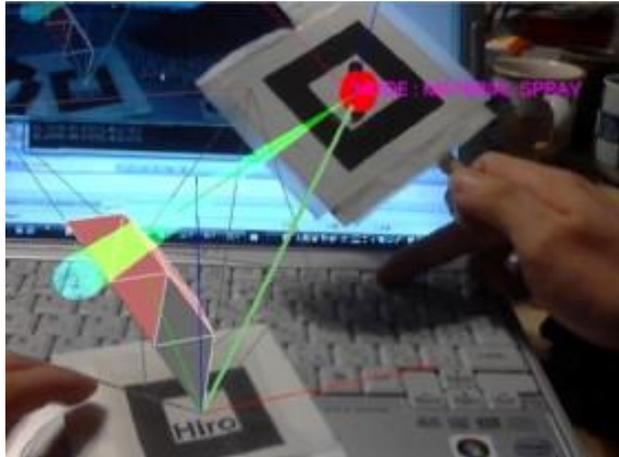


図 2-33^[69] モデリングの進行：ユーザーはヘッドマウントディスプレイを装着して、右手の AR マーカーからボクセルを吹き付けてモデリングを行う。左手に持つマーカーに、三角ピラミッド空間のオクテットボクセルが AR 空間上に投影されている。半透明の円錐がエアスプレーで、先端に表示される球はその効果および範囲を示す。

(2) 粒子の集合として表現された液体を最大 4 つの屈折でスクリーンスペースでのレンダリング法

粒子表現された液体は、リアルタイムアプリケーションでは単屈折でのみレンダリングされることが多く、液体の現実性が低下する。Imai らは、粒子表現された液体を最大 4 つの屈折でリアルタイムにレンダリングする手法を開発した^[70]。キーとなるアイデアは、粒子をスプラッシュ（水しぶき）とそれらの集合体（すなわち液体ボディ）に分離しそれぞれの前面と背面の一对の深度マップを生成する。スプラッシュの深度マップはそのまま使用するが、集合体の深度マップは小さな隆起を減らすために平滑にする。さらに物理的な光減衰を考慮することにより、従来よりもより現実味のある液体をレンダリングすることができる。

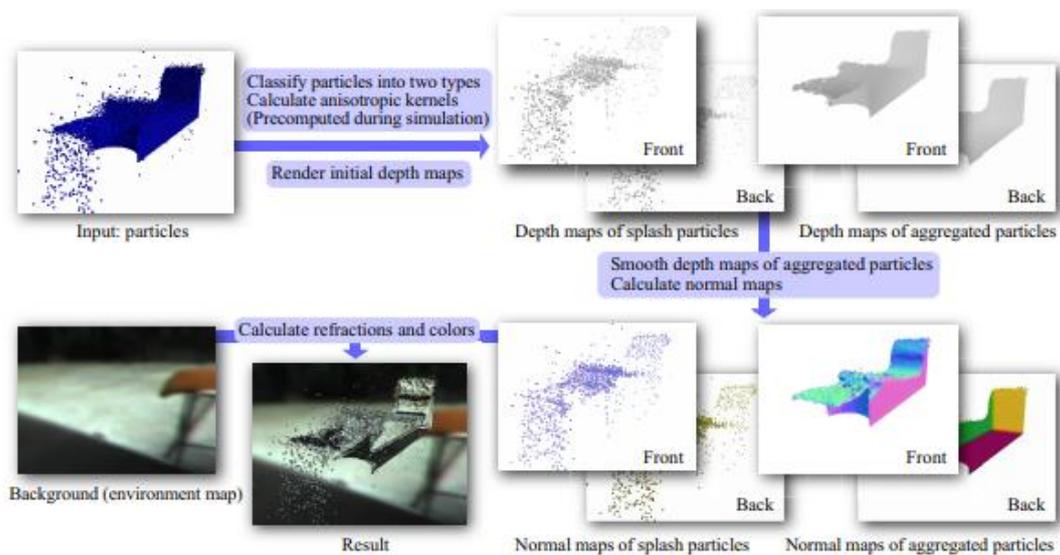


図 2-34^[70] 粒子表現されたスプラッシュあるいはそれらの集合体としての液体と、液体を表現

するための異方性カーネル（特徴空間を計算する手法）が与えられると、スプラッシュおよび液体各々の前面および背面の深度マップがレンダリングされる。さらに液体の深度マップは、反復平面フィッティングによって平滑化され、最後に屈折および出力色を計算して結果画像を生成する。

(3) 3次元キャラクターモデルを半自動的にスーパーデフォルメするための技術

Wangらは、3次元キャラクターモデルを半自動的にスーパーデフォルメ（SD）するためのシステムを開発した^[71]。スーパーデフォルメされたキャラクターは、かわいい外観を高めるために、日本のアニメーションやマンガでよく見られる誇張のためのユニークなスタイルで、具体的にはずんぐりした手足とオーバーサイズの頭部で太っている。リグ付きの参照SDモデルとターゲットキャラクターモデルを与えられると、このシステムはターゲットモデルのリグを自動的に計算し、体の形状を測定し、参照体型に変換することで四肢を短くし、頭部を大きくする。さらに、生物学的な洞察に基づいた単純な変形を適用して、ターゲットの顔を若くする。この方法は視覚的に好ましいSDキャラクターモデルを素早く作成できることを実証した。

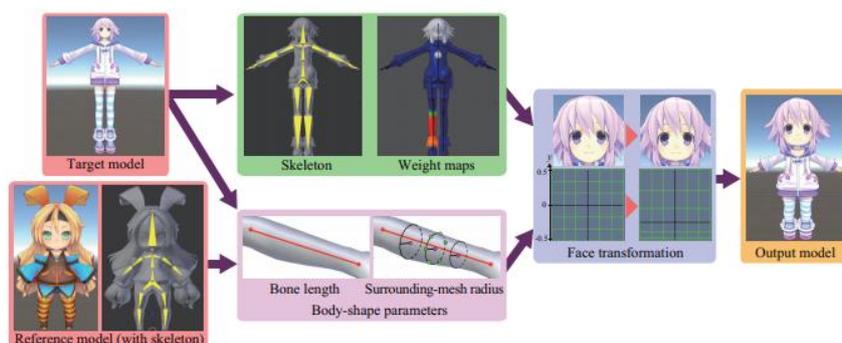


図 2-35^[71] システムの概要。ターゲットSDモデルおよび参照SDモデルを与えられると、体型パラメータおよび目標骨格ならびに重量マップを計算する。目標の顔面に単純な変換を適用した後、出力SDモデルを得る。

(4) 単一の画像内で詳細な外観変化を伴う風化効果を生成する効率的な方法

Iizukaらは、単一の画像内で詳細な外観変化を伴う風化効果を生成するための効率的な方法を提案した^[72]。従来の方法は風化した物体の彩度や反射率を変えるだけであり、繁茂する苔や剥がれつつあるプラスターのような細かい陰影やテクスチャーの変化がある素材には不十分であった。提案の方法は、風化度分布によって駆動されるシームレスパッチベース合成を介して、そのような詳細な特徴を伝播させる。従来の方法とは異なり、風化度は幅広い色のバリエーションを持つ素材であっても、放射基底関数⁵⁰を使用して効率的に計算される。グラフカットによる最適化を使用して最も風化した領域を「風化見本」として特定し、そこから風化パッチをサンプリングする。この方法では様々なタイプの詳細な

⁵⁰ 放射基底関数：函数近似において、各々適当な点に関して球対称となる実数値函数からなる基底を考えるとときの各基底函数。

風化効果を対話方式で生成することができる。

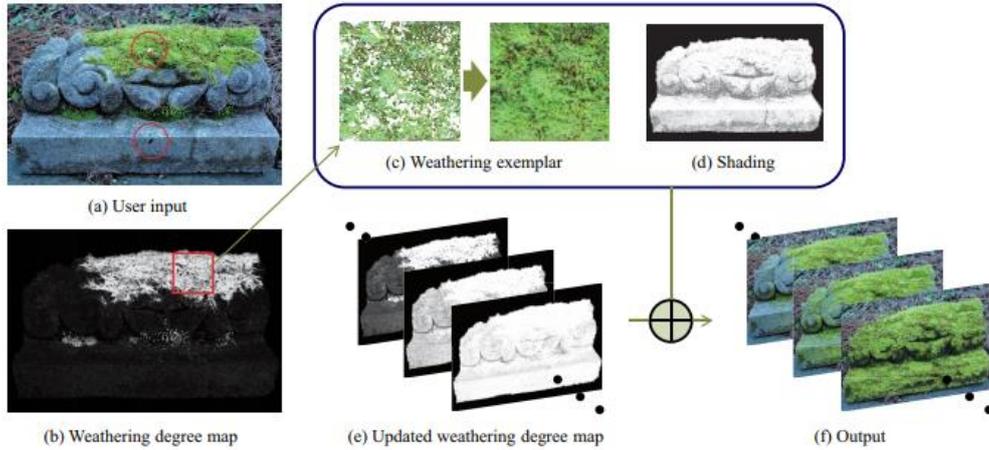


図 2-36^[72] (a) 入力画像のオブジェクト領域が与えられると、ユーザーは最も風化した画素（白）と最も風化の弱い画素（黒）を走り書きで指定する。(b) 次にラジアルベース関数補間に基づいて風化度マップが計算される。(c) グラフカットを用いて高度に風化した領域を抽出し、穴を埋めることにより風化モデルを生成する。同時に、(d) 陰影度マップが計算される。(e) 風化度マップが更新されると、(f) 陰影度マップに従って、標本からサンプリングされた風化パッチとシェーディングが作成される。

(5) 低ダイナミックレンジ入力から高ダイナミックレンジ画像を推測する方法

1 つの低ダイナミックレンジ (LDR) 入力から高ダイナミックレンジ (HDR) 画像を推測することは、露出不足/過剰および色量子化によって失われたデータを補償する必要があるので厄介な問題である。Endo らはこれに対処するために、たたみ込みニューラルネットワークを用いた完全自動推論のための深層学習ベースのアプローチを提案した^[73]。本手法のキーとなるアイデアは、異なる露出で撮影された LDR 画像（すなわちブラケット付き画像）を合成し、それらを融合することによって HDR 画像を再構成することである。本手法では、3次元デコンボリューション⁵¹（転置たたみ込み）ネットワークを用いて露光量の増減による画素値の相対的な変化を学習することにより、目に見えるノイズなしに自然な色調を再現するだけでなく、飽和した画素の色を再現することができる。

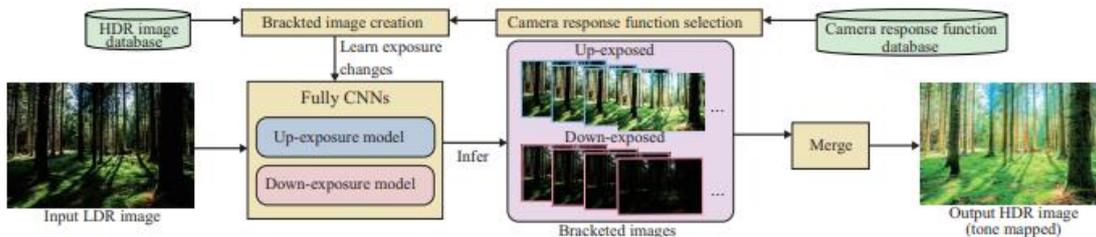


図 2-37^[73] フローは学習フェーズと推論フェーズに分けられる。学習フェーズでは、ブラケットされた LDR 画像が HDR データベースから最初に作成される。次にその画像の露出の変化を

⁵¹ 画像にぼけなどのノイズが入っている場合に、それを元画像にぼけの原因となる関数がかかっている（たたみ込みされている）と考え、その関数を推定して元画像を復元すること。

CNN⁵²に知らせる。推論フェーズでは、学習された CNN が単一の入力 LDR 画像からの異なる露出で LDR 画像を計算する。

(6) 肝臓のリアルタイム変形を視覚化する 3 次元仮想肝切除シミュレーションソフトウェア (Liversim)

Oshiro らは、肝臓がどのように変形するかをリアルタイムに可視化する機能を有する 3 次元肝切除シミュレータ「Liversim」を開発した^[74]。このソフトウェアは任意の方向から 3 次元モデルを表示し、モデルの色と不透明度を変更し、ユーザーのやりとりに基づいてモデルを変形し、術者による肝組織および肝内血管の切開をするという 4 つの基本機能を提供する。従来のソフトウェアプログラム SYNAPSE VINCENT⁵³と新規ソフトウェアプログラム Liversim とをそれぞれ使用して仮想肝切除術を受けた患者について、そのあとで行われた実際の肝切除を受けた患者の間で分析し、さらに医学生および外科医からのアンケート調査を行った結果、Liversim によるシミュレーションと切除プロセス中の実際の手術との間に明らかな差異はなく、医学生と外科医は、Liversim の画像が実際の肝切除とほぼ同じであると報告した。Liversim を用いた肝臓のリアルタイム変形を伴う仮想肝切除術は、肝切除術および外科教育の安全な実施に有用である。

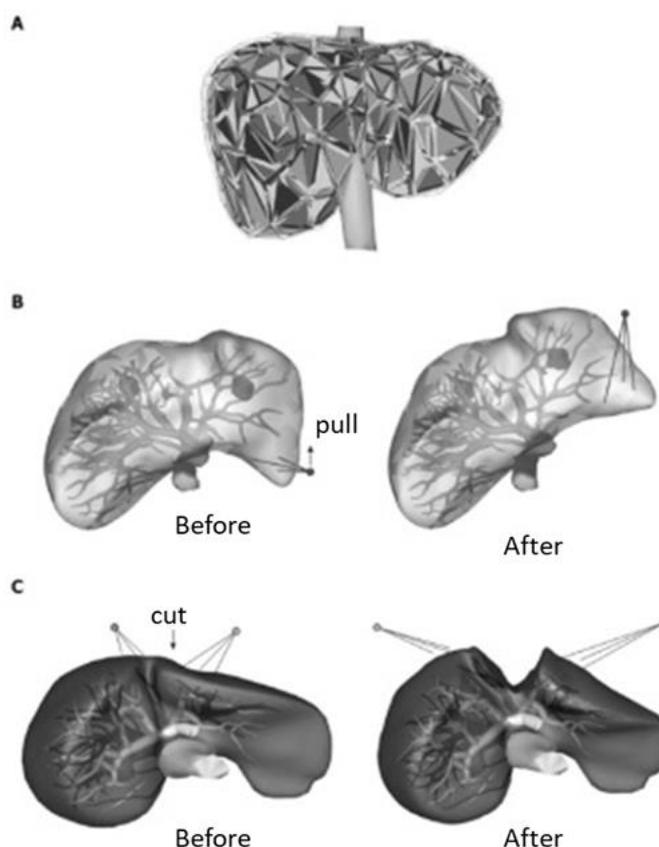


図 2-38^[74] 肝臓の三次元四面体メッシュモデル。A：肝臓、下大静脈、腫瘍および胆嚢モデル

⁵² CNN(Convolutional Neural Network)：畳み込みニューラルネットワーク

⁵³ 富士フィルム(株)が販売している、CTやMRIなどの断層画像から高精度な3D画像を描出し、解析することができる医療向け3D画像解析システム。

を四面体メッシュモデルに変換され、有限要素法による物理シミュレーションで検討された。B、C：肝臓モデル内に血管表面モデルを配置し、肝臓モデルの変形に応じて位置を変えた。

(7) 低コストで内部構造の視認性のよい肝臓モデルを3次元プリントで作成する方法

3次元プリントで肝臓モデルを作成することはコストがかかり、内部構造の視認性もやや阻害される。Oshiroらは、これらの問題を同時に解決する新しい構造を持つ肝切除術用の3次元プリントされた肝臓を開発した^[75]。この構造は、コストがかかる透明材料を使用せずに外側のフレームを肝臓の表面に沿って設置したので、構造物の内部を直接観察することができる。この新しい3次元プリント肝臓モデルを用いて切除線を明確にシミュレートし、手術を安全に行うことができた。本手法のプロセスはコスト効率が高く、生産時間が短く、他のプロセスよりも可視性が向上した。このアプローチは将来の外科手術に有用となるであろう。



図 2-39^[75] 新規の3次元プリントによる肝臓のモデル

(8) ポップアップカードと導電性インク印刷技術とを組み合わせた触知できるユーザーインタフェース (InsTangible)

Zhaoらは、ポップアップカードを用いたタンジブルなユーザーインタフェース「InsTangible」を開発した^[76]。ポップアップカードには導電性インクを用いた回路が印刷されている。この回路図は、新たに開発した回路レイアウト計算ソフトウェアにより自動的に計算され、印刷可能な結果として出力される。回路レイアウトは、レイアウトの厚さ、配線間のスペース、および配線が交差しないことの3点を考慮して、最短経路になるように作られる。折り目パターンとレイアウトは、レイアウトの計算時に別々に印刷される。電子要素を取り付けることで対話型のポップアップカードを作ることができる。使用試験では、初心者でもオリジナルのインタラクティブなポップアップカードを作成し、そのカードを使用してアプリケーションを作成できることを確認した。

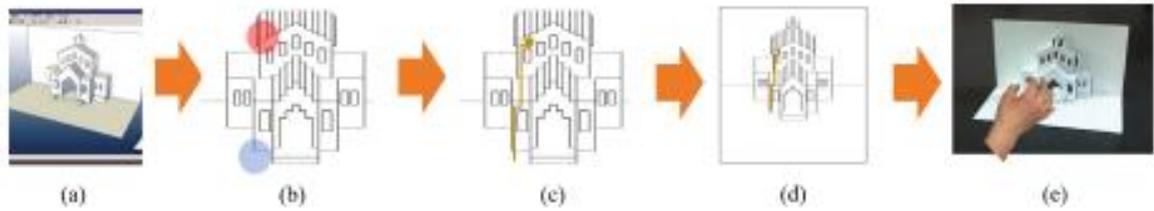


図 2-40^[76] 本法の概要：(a)ユーザーによるポップアップカードのデザイン、(b)ユーザーがスタートとエンドポイントを指定、(c)回路レイアウトが自動的に計算される、(d)データは印刷される形に変換される、(e)完成したモデル

(9) 虹彩折りたたみパターンの設計と構築を支援するインタラクティブな計算ツール

虹彩折りたたみはカメラの絞りのように螺旋パターンを形成する紙の層状のストリップからなるアート形態で、カードとギフトタグを作るために使用できる。Yuki Igarashi らは、オリジナルの虹彩折りたたみパターンの設計と構築を支援するインタラクティブな計算ツールを開発した^[77]。虹彩の折りたたみパターンの設計は、シードポリゴンの周りの外接多角形シーケンスの計算として定式化される。通常のポリゴンに対しては頂点の位置を解析的に計算することは可能であるが、不規則なポリゴンについてはそれを行うのは簡単ではない。本手法は任意の凸型シードポリゴンに適用可能な、不規則なポリゴンの数値的方法を提供する。ユーザーはアート形態を構築するに先立って、システムを用いて様々なパターンを素早く試すことができる。

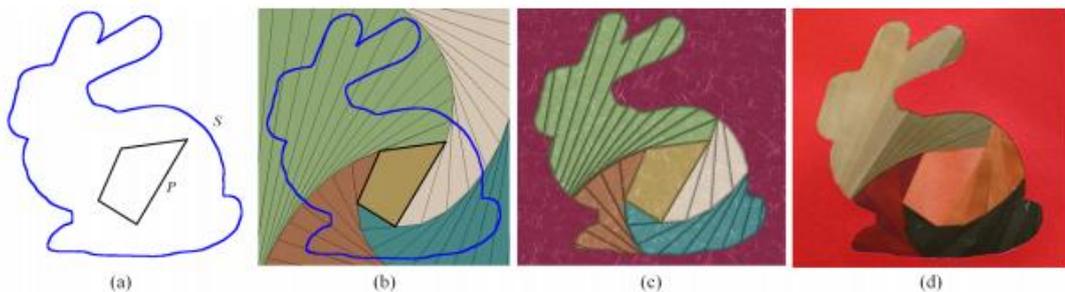


図 2-41^[77] システムの概要：(a)ユーザーはまず、アウトライン S (青の線)とシードポリゴン P (黒の線)を入力、(b)システムは自動的に虹彩折りのパターンを計算する、(c)テクスチャレンダリングを行う、(d)ユーザーは最後に物理的パターンを生成する。

(10) ブロック組み立てのためのコンポーネントベースの構築指針

崩れやすいブロックの構造を持つ LEGO の彫像は、組み立ての際に容易に崩れることがあるので、うまく設計された一連の指示が非常に重要である。単純な 1 レイヤーずつ積み上げるボトムアップアセンブリは、特にオーバーハング領域が存在する場合にはうまく機能しない。Zhang らは、脆弱ブロックモデルを効率的にアセンブルするためのユーザー支援を目的とした、コンポーネントベースの組み立て指示を生成する方法を提案した^[78]。この方法は弱く結合したブロックにおけるセグメント化と、浮動ブロック回避のためのセグメ

ント化の2つの独立したセグメント化を含んでいる。これらのセグメンテーションに基づいて、モデル全体が複数のコンポーネントに分割される。組み立て指示のセットはそのコンポーネントの組み立て順序を決定することによって生成される。この方法の有効性は、ユーザー調査を通して実証された。

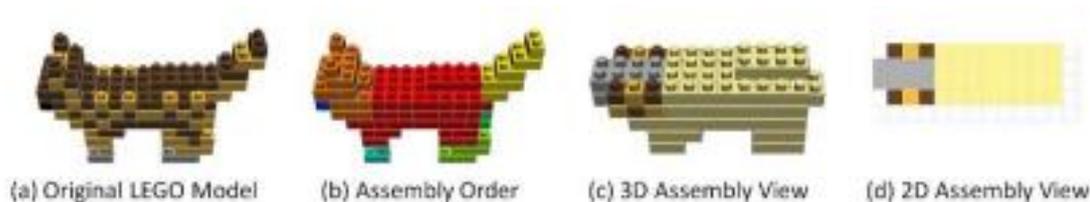


図 2-42^[78] グラフィカルな指示ガイドの例。ガイドは最初に（赤色の最初、青色の最後の）コンポーネントの組み立て順序を示すために（a）から（b）に切り替えてから、各コンポーネントのレイヤーバイレイヤーのアセンブリに入る。現在のレイヤーのブロックは、2つのビュー（c、d）で表示される。アセンブルされているコンポーネントの元のブロックカラーのみをレンダリングし、他のカラーはカスタマイズされたカラー（ベージュなど）でレンダリングする。

(11) ミニブロックアートワークのデザインシステム

ミニブロックアートワーク⁵⁴は、審美的に好ましいブロックレイアウトを持つ抽象化された低解像度ブロック構造の一種である。従来の LEGO 構造と同様に、ミニブロックアートワークはブロック間の強い相互接続、すなわち安定したレイアウトを必要とする。しかし、ミニブロックのアートワークを異なるものに行っているのは、高度に抽象化された形や色に対する新しい要件と、モデル自体の対称性を考慮したブロックレイアウトの規則性である。Zhang らは、3次元メッシュの入力に基づくミニブロックアートワークの作成を支援するために、安定性、対称性、色分解などの様々な特徴からなるブロック設計システムを提案した^[79]。

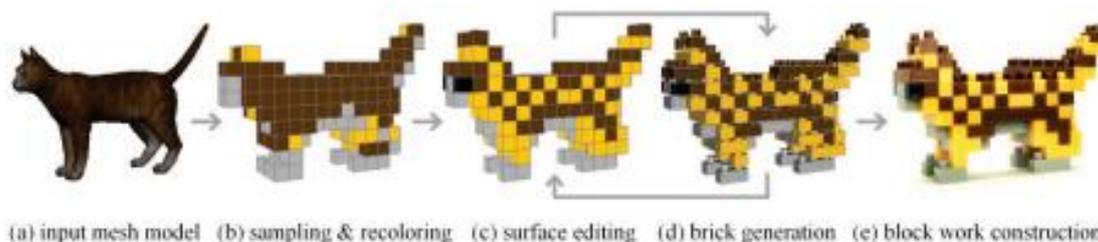


図 2-43^[79] 提案されたミニブロックアートワークのデザインシステムの流れ

(12) Edit propagation のための 1 枚の画像から特徴量を抽出する手法

Edit propagation は、画像特徴の類似性に基づいてユーザーストロークを介して実行される、様々な画像編集（例えば、色付けおよび再現）を画像全体に伝播させることができる技術である。従来のほとんどの研究では、ユーザーはそのニーズおよび目標画像に従って、各画像特徴（例えば、色、座標、およびテクスチャー）の重要性を手動で決定しなければな

⁵⁴ この研究には、（株）カワダ製の世界最小級ブロックという「ナノブロック」が使われている。

らない。Endoらは、既存のフィーチャを手動で調整するのではなく、単一の画像内のユーザーストロークからのみフィーチャ表現を自動的に学習する表現学習に焦点を当て、深層ニューラルネットワーク(DNN)を用いたEdit propagation法を提案した^[80]。DNNのために新たに開発した学習アルゴリズムによって、勾配の消失の問題をなくすことができ、望ましくない局所最適解になることを避けられる。

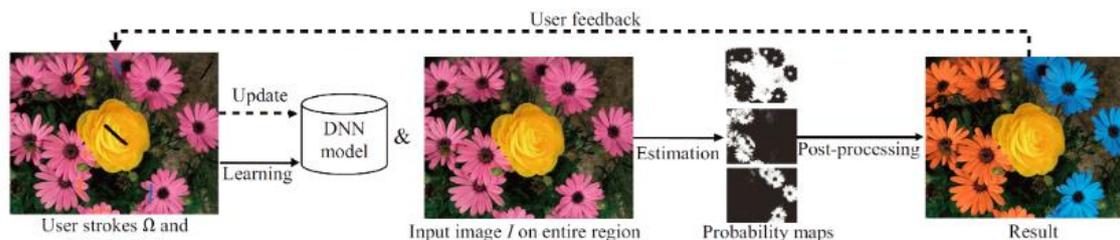


図 2-44^[80] システムはまず、入力画像およびユーザーストロークからDNNモデルを学習する。次にDNNモデルを用いて全画素のストローク確率を推定し確率マップを求める。最後に確率マップは後処理によって洗練される。

(13) オリジナルのパッチワークパターンを支援するインタラクティブなシステム (Patchy)

パッチワークは布を縫い合わせて大きなデザインを作るよく知られた手芸である。大きなデザインのパッチワークは様々な形状のパターンを組み合わせで作る。初心者は、プロのパッチワーカーのように完成したパッチワークをイメージしながらオリジナルのパターンをデザインすることが難しいため、幾何学的なパターンや既成のパターンを使うことが多い。Yuki Igarashiらは、オリジナルのパッチワークパターンのデザインを支援するインタラクティブなシステム「Patchy」を提案した^[81]。このシステムによってユーザーは画面上で試行錯誤を繰り返しながら、様々な色の布を用いてオリジナルのパッチワークパターンをデザインすることができる。

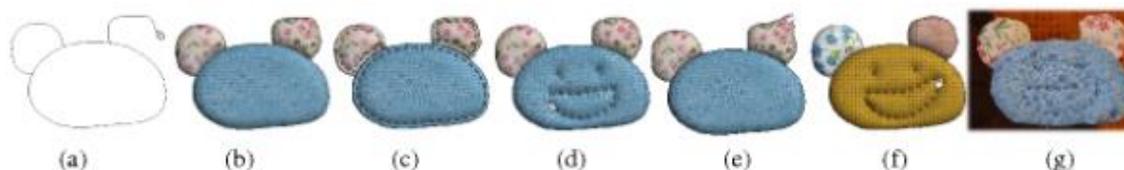


図 2-45^[81] システムの概要: (a) ペイントインタフェースを使用してパッチワークパターンシルエットを設計する。(b) 次にカラーファブリックパターンを設計すると、(c) ステッチストロークが自動的に追加されるので、(d) ユーザーは自由形状のストロークを用いてステッチストロークをデザインし、(e) シルエットストロークを引っ張り、(f) ステッチストロークを引っ張り、最後に (g) パッチワークを縫うことができる。

(14) オンラインショッピングで試着を再現するための仮想試着システム

Kanamoriらは、オンラインショッピング中に試着を再現するために、画像ベースの仮想試着システムを提案した^[82]。ファッションモデルと顧客の全身イメージを入力すると、ファッションモデルイメージから衣服イメージを切り出し、それを顧客の体型にフィット

するように変形する。変形するための関数はファッションモデルと顧客の身体の輪郭から自動的に推定する。フィッティングの結果は、顔領域を参照する自動色補正と衣服画像の背後からはみ出した部分を修正することによって、さらに現実に近い試着結果を提示することができた。ユーザーテストによりシステムの有効性を検証した。

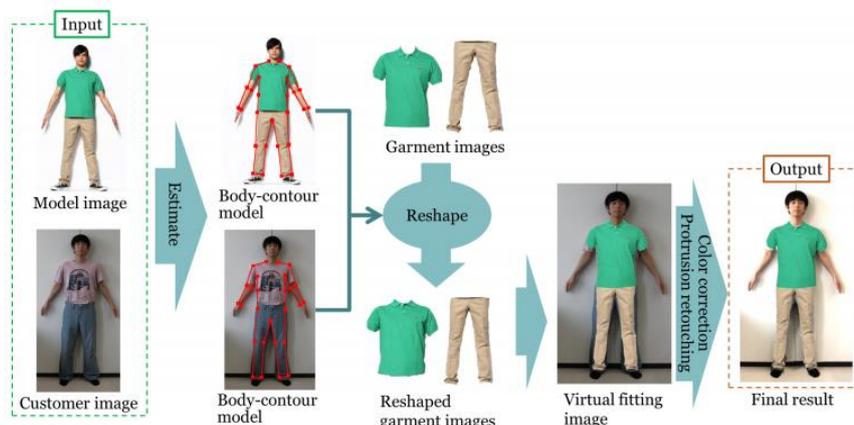


図 2-46^[82] システムの概要

(15) 平坦に折りたたむことができる 3 次元ポリゴンモデルを設計する方法

Kase らは、平坦折りが可能な 3 次元ポリゴンモデルを設計する方法を提案した^[83]。このモデルはサイドパネルと水平の上下のパネルで構成され、垂直に隣接するパネルは、それらの水平エッジでヒンジによって接続される。トップパネルを押し下げることで平坦に折りたたむため、トップパネルを引き上げると展開する。モデルを平坦に折りたたむことができるようにするための重要なアイデアは、サイドパネルのエッジに沿って垂直スリットを追加することである。水平に隣接する側部パネルは、折りたたんだ状態で分離され、配備された状態で閉じた立体モデルを形成するように接続される。ユーザーはまず、トップパネルを凸多角形として描画し、次にポリラインを描いて断面を指定する。入力データによって生成された多面体モデルは平坦性条件を満たすことは稀なので、数値最適化に基づいて断面内の頂点の位置を修正する。

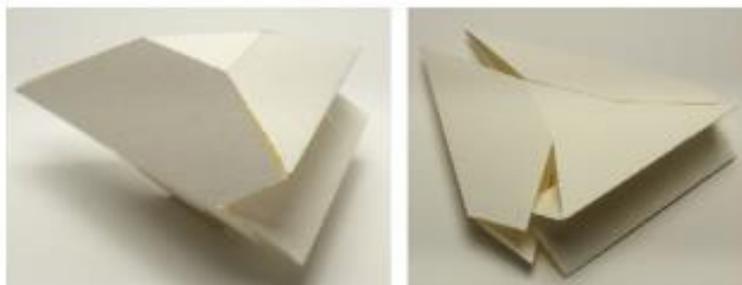


図 2-47^[83] 平坦折りができるポリゴンモデルの例。上面と底面が多角形(この場合は 3 角形)パネルになっていて、側面は 3 つのヒンジでつながったパネルで構成される。左は使用時、右はたたんだ状態の形。

(16) 3 次元形状を平坦折り可能な多角形モデルに半自動的に変換する方法

Miyamoto らは、与えられた 3 次元メッシュを剛性パネルからなる平坦折り可能なモデルに変換する方法を提案した^[84]。これまでに、平行な上部および下部パネルと、それらと垂直に接続されたサイドパネルから構成される平坦に折りたたむことができるモデルの単一部品の手動設計を支援する方法が提案されているが、本研究の方法では、入力するメッシュを複数の凸面部品で近似することにより、より複雑な形状の折りたたみ可能モデルを半自動的に生成する。ユーザーは各凸要素の折りたたみ方向と形状近似の忠実度を指定する。ユーザー入力を考慮して、モデル全体を平坦折りするために、各凸要素のパネルの形状と位置を最適化する。ユーザーは出力モデルの折りたたみアニメーションを確認できる。

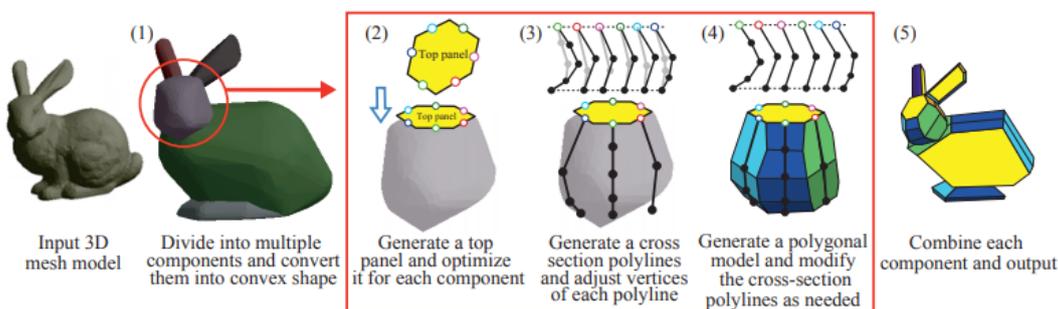


図 2-48^[84] (1) 入力された 3 次元メッシュを分割し、各メッシュセグメントを凸包で置き換える。これは平坦折りコンポーネントに変換される。次に (2) 各コンポーネントのトップパネルと (3) 断面ポリラインを生成して最適化する。次に (4) 頂部パネルと断面ポリラインから平坦折りコンポーネントを生成し、必要に応じてポリラインを再度修正する。最後に、(5) 平坦折りコンポーネントを組み合わせて折りたたみ式モデルを出力する。

(17) 軸対称構造を有する三角形の面からなる 3 次元折り紙のための新規な設計方法

Zhao らは、軸対称構造を有する三角形の面からなる 3 次元折り紙のための新規な設計方法を提案した^[85]。この方法は回転対称の折り目パターンをインタラクティブにデザインし、リアルタイムで 3 次元折り紙を分析的に計算する。この方法により展開性を維持しながら 1 つのパラメータを変更して 3 次元折り紙を軸対称に変形させることが可能となった。パラメータを変更することにより、“円弧に沿った平坦折りたたみ”と呼ばれる 3 次元折り紙を折りたたむ方法につながる。プロトタイプシステムを使用することにより、実際にそれらを作成する前に、様々な折り紙のデザインをインタラクティブに探求した。妥当性を実証するためにいくつかの 3 次元折り紙と折りたたみシーケンスを提示した。

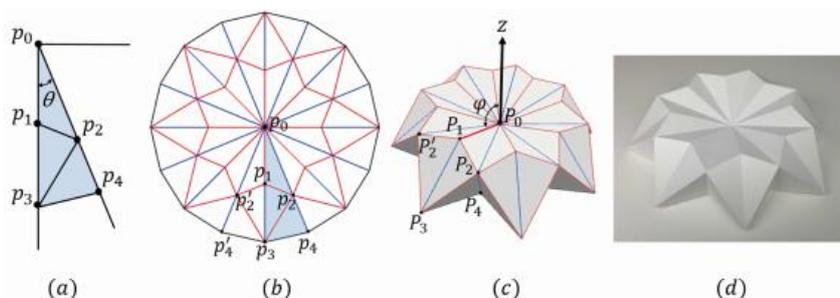


図 2-49^[85] (a) 回転相似形の 1 つ (この場合は全体の 8 分の 1) の右側のピースを設計。左側

のピースはその対称形、(b)回転相似形の折り目パターン、(c) P_1P_0 と z 軸の間の角度を決めると 3次元折り紙が計算される、(d)デザインされたモデルから作った作品。

(18) 軸対称の 3次元折り紙を一般的な 6折り目ベースで設計する方法

Zhao らは、軸対称の 3次元折り紙を一般的な 6折り目ベースで設計する方法を提案した^[86]。この方法は、吉村パターン⁵⁵のような従来の 6つの規則的な折り目とは違って、折り目線の長さが規則的または不規則になるように一般化し、その折り目パターンをデザインすることに基づいている。まず、このような一般的なベースからなる折り目パターンを対話的に生成し、次に軸対称構造を有する 3次元折り紙形状を解析的に計算する。計算された 3次元折り紙の変化を探索するために、様々な構成、すなわち入力パラメータのセットを実証した。3次元折り紙には複数の自由度があるが、1つのパラメータを連続的に変更することで、形状を軸対称に配置または平坦化できるモーションを提示する。3次元折り紙を設計するこの方法は、セルフ折りたたみテッセレーションから配備可能なアーキテクチャに至るまでの潜在的なアプリケーションを有している。

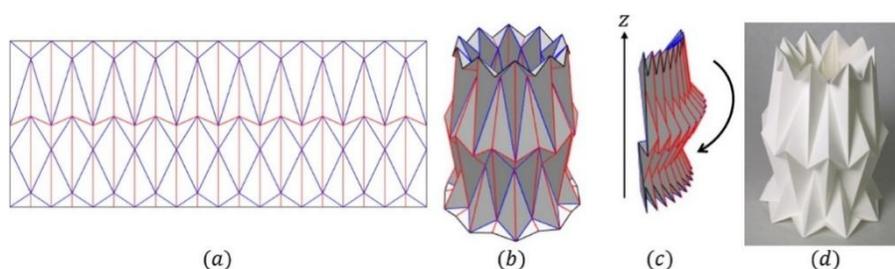


図 2-50^[86] (a)デザインされた展開図(赤線は山折り、青線は谷折り)、(b)組立図、(c)矢印のようにたたんで平坦にすることができる、(d)完成した折り紙作品

(19) 正方形/斜めのグリッドとその折りたたみ可能な折り目パターンの列挙

いくつかの基本折り紙形状の折り目パターンは、45度グリッドシステム、すなわち、 4×4 サイズの正方形/斜めグリッド内に入る。このグリッドシステムは、正方形に簡単に折り目が付けられ、その柔軟性によりエッジに沿って折りたたむことによって様々な形状を作ることができる。しかし、これまでグリッドから作られる形状の数は知られていなかった。Matsukawa らは、局所的に平坦な折りたたみが可能な形式的な折り目パターンは 259、650 および 300 であり、そのパターンによって得られる形状の数は 13 および 452 であることを列挙した^[87]。さらに、すべての形状が自己交差を伴わずに平坦に折りたたまれることができることを検証した。自己交差によって平坦な折りたたみができないいくつかの正式な折り目パターンも見出された。

⁵⁵ 吉村パターン：円筒をつぶした時に現れるパターンと同じ構造を持ったパターン。

2.2.3 稲見グループ

(1) 第三者の視点からダイビング体験を記録し、後でその体験を想起させるシステム (PukuPuCam)

Hirose らは、第三者の視点からダイビング体験を記録し、後でその体験を想起させることができる「PukuPuCam」システムを提案した^[88]。「PukuPuCam」はひもを使用してフローティングカメラをユーザーの身体に取り付け、ユーザーの視点の中心を連続的にキャプチャーする。この簡単な技術により潜水速度や水中の波にかかわらず同じ視点を維持することができるので、カメラを意識することなく自然にダイビングすることができる。このシステムの主な目的は、ユーザーの無意識の行動や周囲の環境とのやりとりを記録してダイビング体験を向上させることである。このシステムは撮影記録を増やし、経験を呼び戻すのに役立つ写真を撮影できることがわかった。

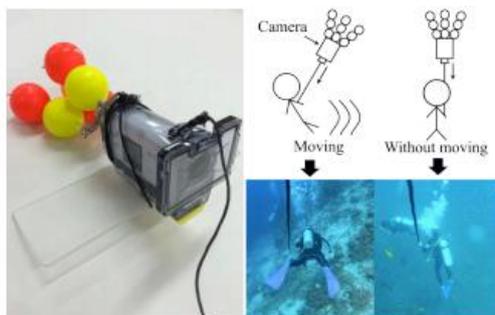


図 2-51^[88] PukuPuCam の外観とカメラ角度のメカニズム

(2) 単一の接触点アクチュエータを介して身体の複数の領域に触覚刺激を与える触覚インタフェース (Ripple Touch)

Withana らは、単一の接触点アクチュエータを介して身体の複数の領域に触覚刺激を与えることができる、低解像度触覚インタフェース「Ripple Touch」を提案した^[89]。これは人体の低周波音波伝搬特性に基づいており、単一の接触点で異なる振幅変調周波数で身体を刺激すると、身体の特定の領域で波エネルギーを発散するので、直接触れないで触覚刺激を作り出すことができる。このシステムは、椅子の下に単純なステレオオーディオインタフェースによって駆動される4つのベースレンジスピーカーを取り付けることで実装される。振幅変調システムの周波数特性の影響を調べた結果、単一の接触点（すなわち、椅子表面）で体の異なる部分に触覚感覚を効果的に作り出すことができることを実証した。このシステムのコンセプトは、エンターテインメント、コミュニケーション、パブリックスペース、車両アプリケーションなどのさまざまな状況で、全身触覚フィードバックを提供する拡張性のあるソリューションとして役立つと考えられる。

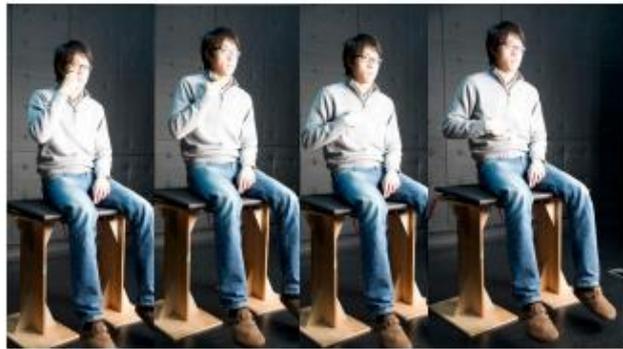


図 2-52^[89] ベンチに埋め込まれたスピーカーステムを使用して作動された体内の触覚感覚の位置を指し示すユーザー

(3) 想像力を高めるサウンドアニメーションテーブル(Dramagic)

Yamamoto らは、子供の感情体験や身体活動の興味を促し、彼らの創造性を刺激するために設計されたバーチャルサウンドエフェクトによる身体的体験を増強することを目的とした研究を行い、漫画のサウンドエフェクトを使用してテーブルで発生する本物のサウンドを強化する遊び心のあるテーブル「Dramagic」を開発した^[90]。このシステムを検証するために、Dramagic と相互作用する子供たちを観察するためのフィールドテストを実施した。結果は増強された音が、触れる、引っ掻く、擦るなどの身体的な行動を促進することを示している。さらに子供たちはより創造的になり、遊び心のある音に基づいて物語を作り出す傾向があった。



図 2-53⁵⁶ Dramagic のプロトタイプ

(4) 表面振動トランスデューサを用いた触覚フィードバック読み取り用タブレットの拡張

Gu らは、表面振動トランスデューサを用いた触覚フィードバックにするための、読み取り用タブレットを拡張する最初のプロトタイプを開発した^[91]。これは文書をマルチモーダルな読書体験に変えるためであり、この拡張された文書ではテキストは読者に言葉の情報を提供するが、他の感覚は非言語的なキューによって文脈を認識させる。独自のフレームワークを使用して、テキスト、サウンド、アニメーション、触覚を統合した感覚にわたっ

⁵⁶ <http://embodiedmedia.org/project/dramagic/>より引用した。

てこのストーリーテリングがデザインされており、読者の想像力を高め、読書の経験を向上させるストーリーテリングを体験させる。読者は物語に完全に浸りより多くの読書を楽しむことができる。

(5) 着用者の表情を認識するスマートなアイウェア

Masai らは、埋め込まれた光反射センサーと機械学習を用いて、日常生活における装着者の表情を認識するスマートなアイウェアを開発した^[92]。小型の光反射センサーを使用して、顔の皮膚表面と 17 個のセンサーが統合されているアイウェアのフレームとの間の近接度を測定して得られる、装着者の顔の表情を変えるとき皮膚の変形を利用する。Support Vector Machine (SVM) アルゴリズムをセンサー情報に適用した。このセンサーは様々な顔の筋肉の動きをカバーすることができ、日常のアイウェアに統合することができる。このアイウェアは 8 つの表情を認識し (1 回使用では 92.8%、3 日使用では 78.1%)、社会的受容性を考慮して設計され実装されているので、ユーザーはいつでもどこでも着用できる。

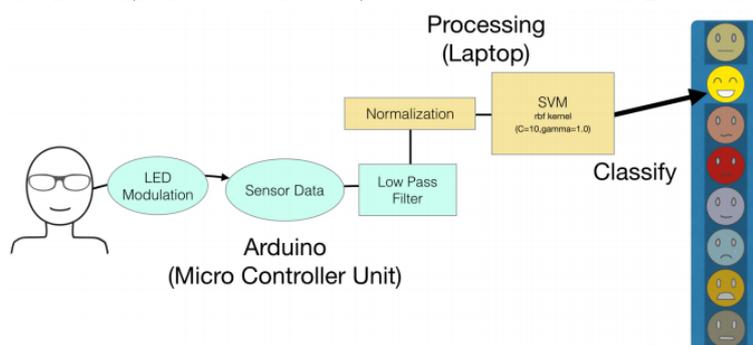


図 2-54^[92] データ処理のパイプライン

(6) 眼球の動きと頭の動きを検出するセンサーを備えたスマート眼鏡 (J!NS MEME)

スマート眼鏡、そして一般的にスマートアイウェアは、ユーザーインタラクションを行えるデザインと、目立たない形での活動トラッキングのための多くの可能性を持つ非常に斬新なデバイスクラスである。Ishimaru らは、眼球の動きを検出するための統合された電極 (Electrooculography、EOG) と、頭の動きをモニターするためのモーションセンサー (加速度計およびジャイロスコープ) を備えたスマート眼鏡「J!NS MEME」の初期プロトタイプを使用するアプリケーションを示し、いくつかのデモンストレーションを行って、左目/右目の動きおよびまばたきを検出する単純な目の動きの視覚化を行った^[93]。ユーザーは目の動きを使って、鳥が障害を避けるよう助ける必要があるゲーム「Blinky Bird」をプレイすることができる。さらに、まばたき、目の動き、頭の動きの組み合わせを使用して、読書および話す行動のオンライン検出を実装した^[94]。

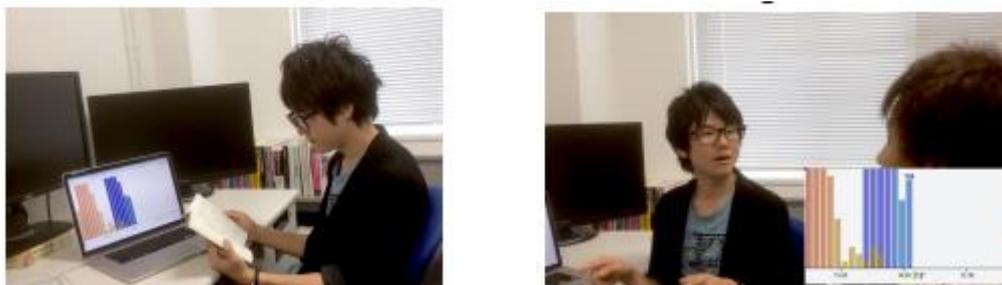


図 2-55^[93] (左)読書中に、MEME は時間に対して読んだ単語の数を記録する。
(右)話をしている間、MEME はその時間を記録する。

(7) 人工四肢置換メタモルフォーシスを用いたボディスキームを変えるインタラクション

Sasaki らは、人工四肢置換メタモルフォーシスを用いたボディスキームを変える新規のインタラクションを提案した^[95]。この研究では、2本のロボットアームをユーザーの体に取り付け、それらのロボットアームを足の動きで操作する。足の指の動きを検知するソックス型デバイスを用いてロボットハンドを制御し、膝と足に付けた光学トラッキングマーカーによりロボットアームの動きを制御する。ロボットハンドには握る力を計測する触覚センサーが内蔵されており、物に触れる感覚はソックス型デバイスの足指にフィードバックされる。

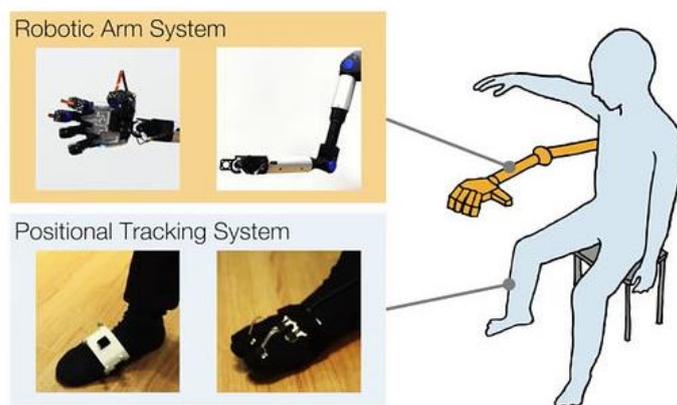


図 2-56⁵⁷ 足に取り付けた光学トラッキングマーカーとソックス型デバイスにより、ロボットアームの動きを制御する。

(8) 手の影を用いたインタラクションモダリティ (Silhouette Interactions)

Chita らは、人が自分の身体の延長として手の影を使用して物理的環境と相互作用する、「Silhouette Interactions」のコンセプトを提案した^[96]。このコンセプトの初期試作システムを実装し、家電制御のアプリケーションを例として、興味のあるアプライアンス、アクション、および使用すべきシャドウジェスチャを識別するためのユーザー調査を行った。その結果、すべてのユーザーがこの直感的なインタラクションスタイルを好むことが

⁵⁷ <http://tomoya.tech/projects/metalimbs.html> のビデオから引用した。

わかり、また、アプリケーションのそれぞれケースに使用する簡潔でインタラクティブなボキャブラリー（シャドウジェスチャー）を確定することができた。

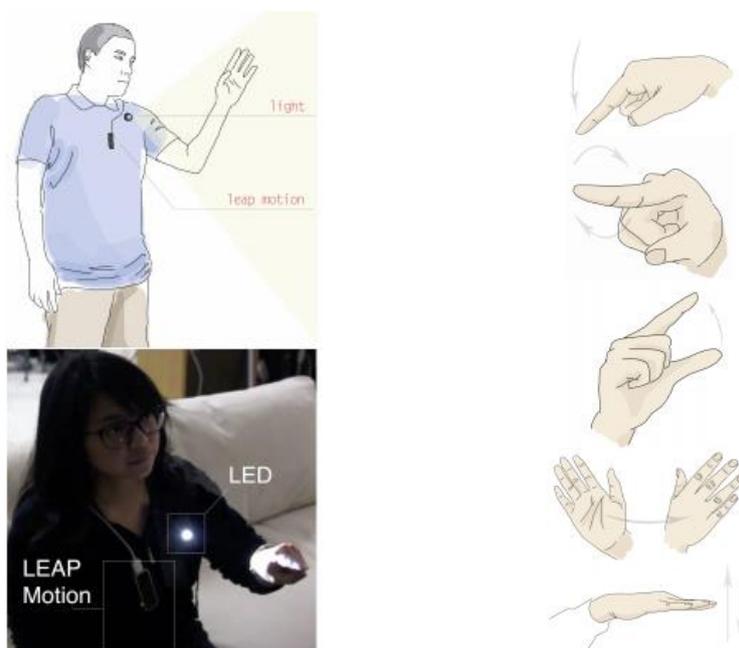


図 2-57^[96]（左）初期試作システム、（右）ユーザー調査から生まれプロトタイプに使われたジェスチャー例

2.2.4 本プロジェクトに参加した研究者の発展的研究

本プロジェクトに参加した研究者のその後の研究の中から、研究者別にいくつかの事例を紹介する。なお、2018年10月現在における各研究者の所属をカッコ内に記す。（海外から参加した研究者については、次項で述べる。）

(1) 渡邊恵太（明治大学大学院先端数理科学研究科）に関する発展的研究

①ワイヤを用いた成形を含む 3D モデリングアプローチ (WireMolding)

3次元プリンタの普及に伴い、個人の生活に根ざした3次元プリンタの使用シーンが想定されるようになってきた。しかし、身の回りの家具や道具に合わせた造形物を制作する場合、ものの形や大きさに合うように3次元モデルを設計しなければならず、モデリングの知識や技術を持たない初心者にとっては難度が高い。Yoshimuraらは、実際の個人用3次元印刷のための3次元モデリング手法である「WireMolding」を提案した^[97]。このシステムでは、針金を押し当てて対象物の一部を型取ったり、自由に曲げて任意の形状を形作ったりして針金の型を造形し、その型を撮影して得た2次元の写真から実寸大の図面を生成する。プロトタイプシステムを開発し、実用例でこの概念の有用性を実証した。



図 2-58⁵⁸ WireMolding による作例

②穴と音響感知を使ってインタラクティブに 3D プリント物を試作する方法 (ProtoHole)

物理的ユーザーインターフェースのプロトタイププロセスは、電子部品の接続とエンクロージャ設計だけでなく、エンクロージャ内の電子部品の配置および構成も含まれるので、モデリング技術を持たない人にとっては複雑で困難である。Katakura らは、穴、内部空洞、およびスイープ周波数音響センシングを使用してインタラクティブな 3D プリントオブジェクトのプロトタイプシステムである「ProtoHole」を提案した^[98]。対象物の内部に高周波スイープ信号を放射することにより、機械学習技術を用いて穴を閉じる際の共振特性の変化を分類することができる。したがって、内部電子部品の配置や配線を考慮することなく、インタラクティブに対象物をデザインすることができる。

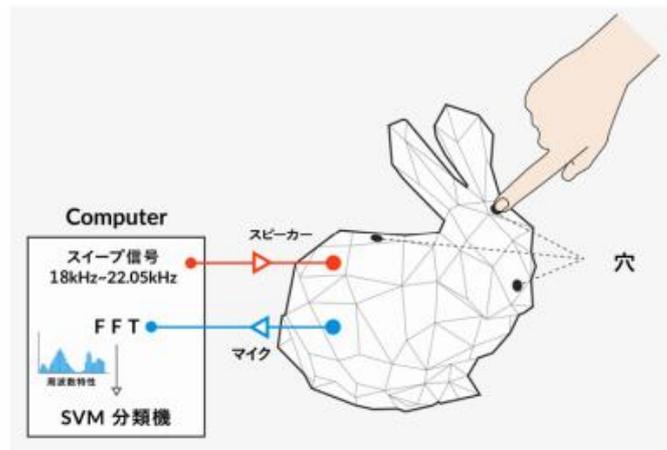


図 2-59⁵⁹ システムの概要

③布地の形状を簡単に変更する新しい技術 (Filum)

Kono らは、糸を使った布地の形状変更技術「Filum」を提案した^[99]。Filum は一方の端にフレンチノットを持ち、反対側の端はモーターに接続されており、近接センサーや温度センサーなどのデータをモニターすることで、人と環境の要求により適合するように布地

⁵⁸ <https://awrd.com/creatives/detail/1020486> から引用。

⁵⁹ <http://katakurashohei.me/project/protohole/> のビデオ画面から引用。

の形状を自動的に変更することができる。さらに、Filum は不必要になった場合には布地から取り除くことができるので、通常の布地に戻すことができる。

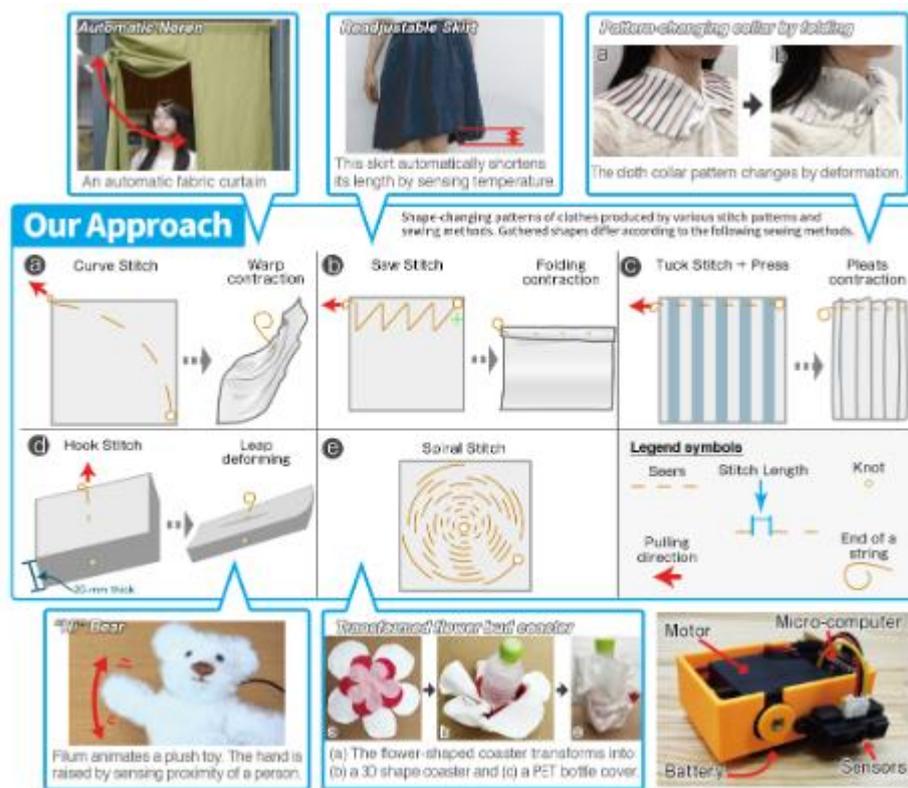


図 2-60⁶⁰ 本アプローチの 6 つの方法（中段）とそれぞれの作例（上、下段）

④キッチンカウンターにレシピを組み込み、ユーザーを直接ナビゲートする調理支援システム (MimiCook)

何か物を作るときに文書を参照することは一般的なことであるが、記述された内容と実際の作成の文脈との間のギャップに起因する困難がある。例えばレシピに従って料理をするとき、レシピの現在の位置を見失うとか、複雑な計量単位のために材料の必要な量を誤ってしまうとか、間違っしてステップをスキップする可能性がある。Sato らは、実際のキッチンカウンターにレシピを組み込み、ユーザーを直接ナビゲートする調理支援システム、「MimiCook」を提案した^[100]。このシステムはコンピュータ、デプスカメラ、プロジェクター、スケーリング装置で構成され、道具や食材に直接ステップごとの指示を表示し、ユーザーの状況に応じてガイダンス表示を制御する。料理用の計りもシステムと一体化されており、計量ミスを防ぐのに役立っている。ユーザーの調査の結果、参加者はシステムで簡単に調理することができ、全く初めてのレシピであっても間違いを起こさないことが分かった。

⁶⁰ <http://keita-lab.jp/projects/filum/>より引用。

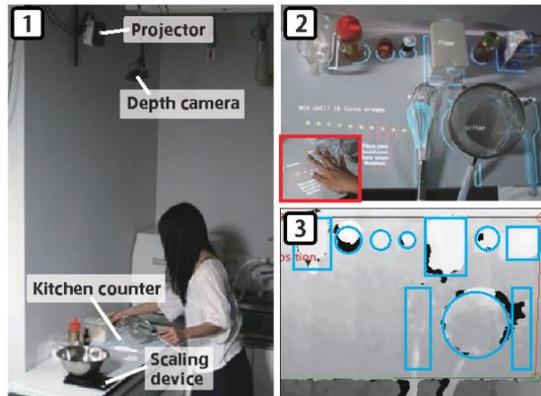


図 2-61^[100] (1) システム全体像、(2)キッチンカウンターに指示が投影されている様子、(3)デプスカメラで (1) を見た様子。青い線は物体が認識されていることを示す。

(2) 杉本麻樹(慶應義塾大学理工学部)に関する発展的研究

①多視点画像を用いた遠隔溶接ロボットの操作

Hiroi らは、遠隔でロボットの操作を行う際、作業の要求精度を満たし、かつ初心者でも直感的に作業内容を指定できる方法として、多視点映像と拡張現実感を用いた溶接ロボットの遠隔操作インターフェースを提案した^[101]。本システムでは、ユーザーが 2 視点以上の映像上で溶接経路を指定すると、実世界の 3 次元溶接経路を計算し、その経路をロボットが溶接する際のシミュレーションを映像に重畳する。実験を通して本システムは溶接に必要な精度を満たして溶接経路を指定できることを確認した。

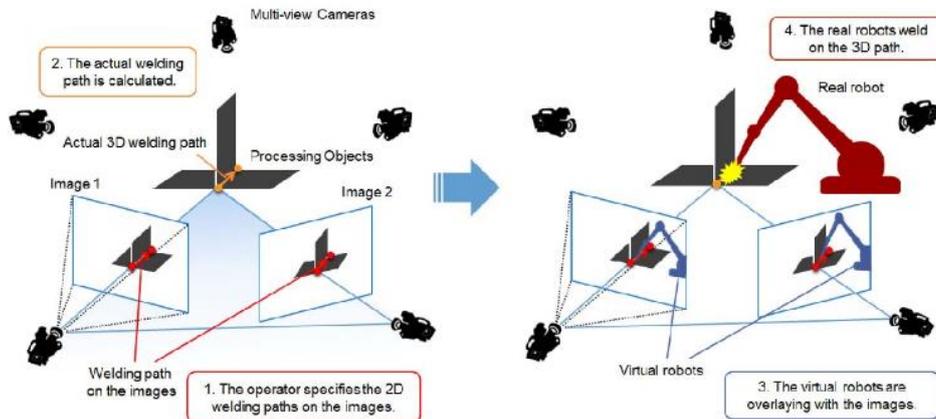


図 2-62^[101] システムの概要：(1) オペレーターが画像に 2 次元の溶接パスを指定、(2) 実際の溶接パスを計算、(3) 仮想ロボットが画像を上塗り、(4) 実際のロボットが 3 次元のパスを溶接。

②リモートロボット操作のための視覚的なプレゼンテーションインターフェース (Pathfinder Vision)

Maeda らは、実環境のモデルとロボットのリアルタイムの情報に基づいて仮想的に物理

的な衝突を視覚化することにより、将来の事象を予測する遠隔操作ロボット制御インタフェース「Pathfinder Vision」を提案した^[102]。このインタフェースは、周辺環境の物理的障害を考慮した画像を提示することによって将来のロボットのルートを計画してオペレーターを支援する。また、ロボットの現在の状態および3次元形状を計算することによって、ロボットのCGモデルをレンダリングするときに、3次元環境のオクルージョン⁶¹も考慮に入れた。この方法の有効性を証明するためにユーザー調査を行った結果は、提案されたインタフェースが衝突回数を減少させることを示し、この方法が、遠隔操作ロボットのリアルタイム動作におけるオペレーターによる経路計画を改善する可能性を有することが分かった。

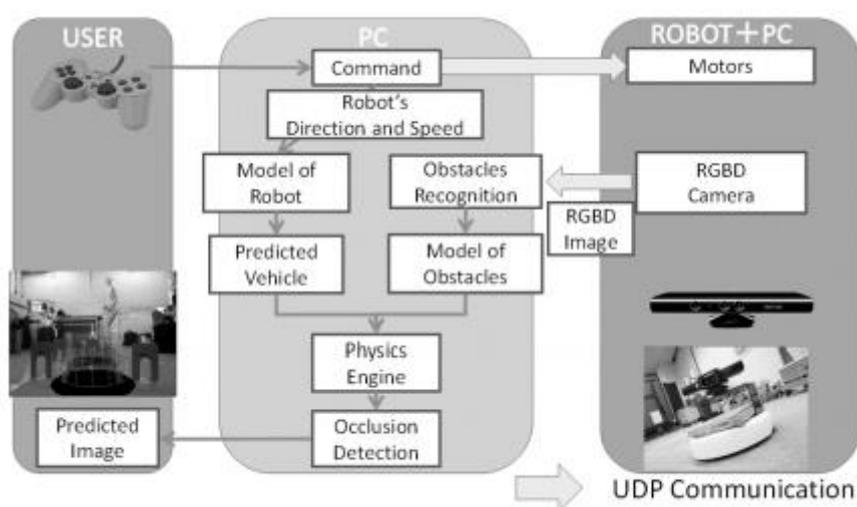


図 2-63^[102] システムの概要

③既存のオブジェクト上のマーカーに基づくレーザー切断技術 (MARCut)

レーザーカッターを使用した典型的な個人によるモノづくりは、物体を原材料や既存の物体の彫刻から作成することを可能にする。物体をレーザーと正確に位置合わせする現在の方法は、間接的な操作のために困難なプロセスである。Kikuchi らは、CAD ベースの設計ツールを使用する代わりに、単純な手作業の方法でマーカーを作成することによって対話的にオブジェクトを作成することを可能にするシステム「MARCut」を開発した^[103]。このシステムは、デザインを表すために物体に直接つけるタンジブルマーカーに基づいてレーザー切断を行う。所望のジオメトリを表すシェイプマーカー、およびカット、彫刻または物体などの操作パラメータを示すコマンドマーカーの2種類のマーカーが利用できる。

⁶¹ 3次元空間では、上下・左右の他に前後関係があり、手前にある物体が背後にある物体を隠して見えないようにする状態が発生する。これをオクルージョンという。

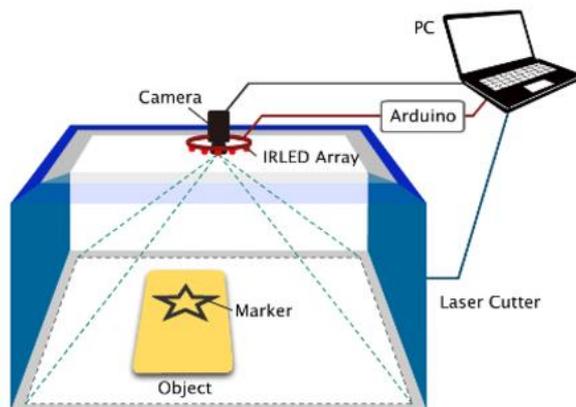


図 2-64^[103] システムの構成

④重心移動によってバーチャル物体の容量提示する把持型触覚デバイス (VolRec)

Koshiyama らは、内部の重心位置を変えてバーチャル物体の容量を仮想的に提示する触覚デバイス「VolRec」を開発した^[104]。この装置は、リニアモーションガイド、重り、および重心の高さを制御できるモーターを使用し、内部の重心位置を変えてバーチャル物体の容量を提示するペットボトル型の触覚デバイスである。重心が変わると把持位置回りの角モーメントが変わるので、結果として擬似的な振りの重さを感じることができる。

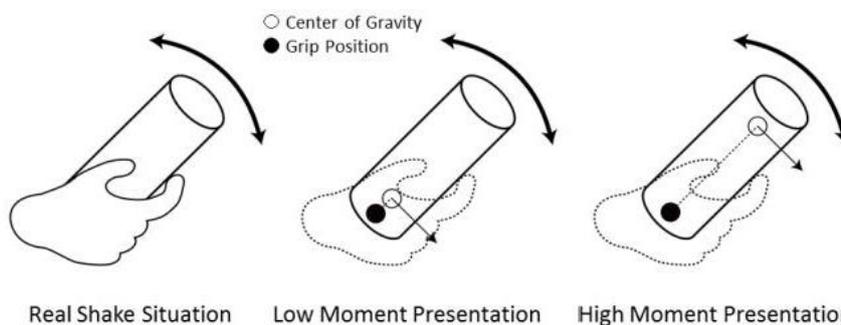


図 2-65^[104] 提案された方法。把持位置の周りの角モーメントが増加するので、物体の体積が増加するとデバイス内の重心が高くなる。

(3) 杉浦裕太(慶應義塾大学工学部)に関する発展的研究

①取り外し可能なフォトセンサーモジュールを使用して柔らかい物体をタッチインタフェースに変身(SofTouch)

Furui らは、クッションのような日常的な柔らかい物体を、非侵襲的にタッチインタフェースに変えるシステム「SofTouch」を開発した^[105]。柔らかい物体の外側に取り付けることができるベルト式センサーモジュールは、赤外光 (IR LED) を照射して物体からの反射強度を測定するいくつかの光反射センサーを備えている。センサーからソフトオブジェクトの表面までの距離の変化を測定するのにセンサーモジュールを使用し、タッチ位置は

SVM(Support Vector Machine)⁶²を使用して推定する。この方法を評価するために、クッション上の9点に触れるときの精度を測定した。既存の日常的な柔らかいオブジェクトを使用して、生活空間に自然に溶け込むだけでなく、各ユーザーの好みに合わせたインターフェースを作成することができる。

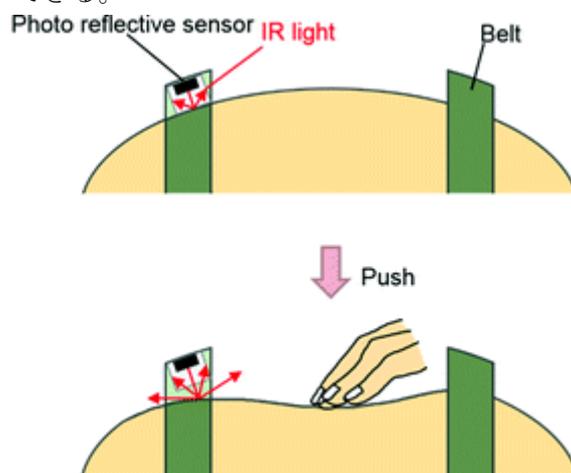


図 2-66^[105] システムの構成。ユーザーが柔軟物を押した時の柔軟物の変形を光センサーで計測することで、接触位置の推定を行う。

②光センサーによる手のジェスチャー認識(Behind the palm)

Sugiura らは、手の甲の皮膚変形を計測することで、ハンドジェスチャーを認識する手法「Behind the palm」を提案した^[106]。手の甲の変形の計測にはいくつかの反射型光センサーを利用する。この光センサーをアレイ状に並べた装着型デバイスを開発した。装置と皮膚までの距離をこの光センサーで計測することで、手の甲の変形を取得できる。システムは、取得したセンサーデータを用いてSVMでハンドジェスチャーを推定する。本システムは、学習段階でLeap Motion⁶³を用いて手の形状を同時に記録するため、ユーザーは自由にジェスチャーを登録することができる。手の甲の変形を歪みゲージで計測してジェスチャーを取得する方法はあるが、本研究はその手法と比べると耐久力もあり、また手に直接貼り付ける手間もなく優れている。

⁶² サポートベクターマシン：1995年頃にAT&TのV. Vapnikが発表したパターン識別用の教師あり機械学習方法であり、局所解収束の問題が無い長所がある。

⁶³ Leap Motion（リープモーション）：2012年にLeap Motion社から販売された手のジェスチャーによってコンピュータの操作ができる入力機器である。マウスや画面タッチを用いずに操作ができる体感型のシステムで、ジェスチャーによって直観的に操作することが可能となる。

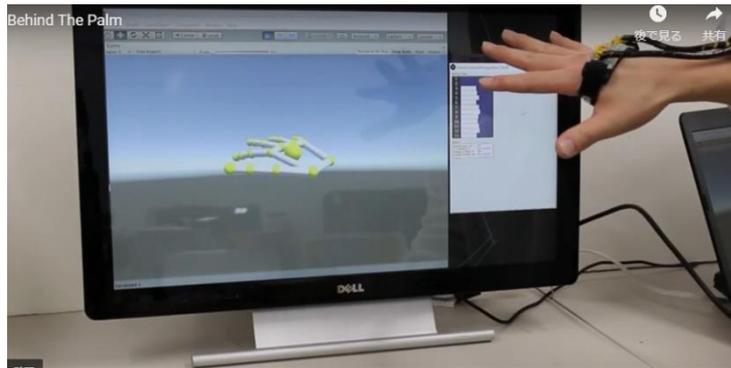


図 2-67⁶⁴ 手の甲を動かすことで、画像の手を動かす。

③耳の入カインタフェース化 (EarTouch)

Kikuchi らは、イヤフォンとしては従来のサイズを保ちつつ、多様な入力を実現する方法として耳自体を入力面として利用する方法「EarTouch」を提案した^[107]。イヤフォンにいくつかの光センサーを装着し、耳の皮膚変形を光センサーで計測することで、耳全体の変形を推定する。本手法で利用する光センサーは反射型の光センサーであり、これは赤外光を発光して、その反射光の強度を取得することで対象物の距離を計測できるセンサーである。これをイヤフォンに装着して耳内の皮膚までの距離を複数点で計測すると、指で耳に触れることによって引き起こされる変形形状が取得できる。取得したセンサーデータを用いて、SVM によりジェスチャー識別をする。これで耳を上下左右に軽く引っ張るようなジェスチャーが認識できる。

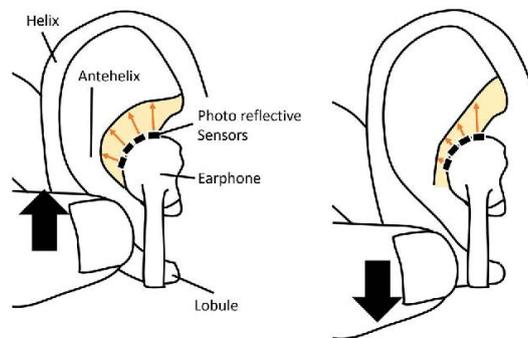


図 2-68^[107] 本手法の原理：
イヤフォンにつけられたセンサーが耳の皮膚の変形を測定する。

④毛皮材料を用いた空中超音波触覚ディスプレイとプロジェクタカメラシステムの幾何校正

空中超音波触覚ディスプレイ⁶⁵ (AUTD) をプロジェクタカメラシステムと組み合わせることで、3次元空間内に物理的に整列した同時性視覚刺激および触覚刺激を提示すること

⁶⁴ <https://lclab.org/projects/behind-the-palm> のビデオのシーンから引用。

⁶⁵ 空中超音波触覚ディスプレイ：多数の超音波振動子を格子状に並べた超音波振動子アレーにより、空中の任意の位置に超音波の焦点を作り出すことで、何も装着していない人体表面に振動触覚を提示することができるデバイス。

が可能である。同時性感覚を可能な限り現実的に維持するためには、AUTD とプロジェクタ-カメラシステムとの間の正確な幾何校正が必要である。Ko らは、カメラ座標系における AUTD の出力焦点を認識するために毛皮材料を利用して AUTD システムの校正方法を提案した^[108]。本発明の方法は、2.63mm の校正誤差を有する校正手順を単純化した。

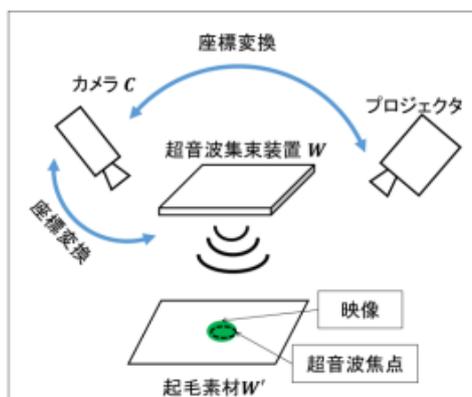


図 2-69^[108] 超音波集束装置とプロカムシステムの幾何校正

⑤筋肉の変形を検出する全身スーツ (MuscleVR)

Shimazaki らは、筋肉の変形を検出する全身スーツ「MuscleVR」を開発した^[109]。このスーツは、フォトリフレクター（フォトトランジスタと赤外線 (IR) LED で構成）とスプリングで構成された伸縮可能なセンサーで構成される。フォトリフレクターはバネに埋め込まれ、バネが伸ばされていないとき、放出された IR 光はフォトトランジスタに反射して戻り、バネが引き伸ばされると放出された IR 光の一部がバネの開口を通して流出し、反射してフォトトランジスタに戻る光を減らす。したがって、ばねが伸びるほど光の量が少なくなる。これを用いてアバターのボディをユーザーの筋肉の変形と同期させることができる VR システムを構築した。

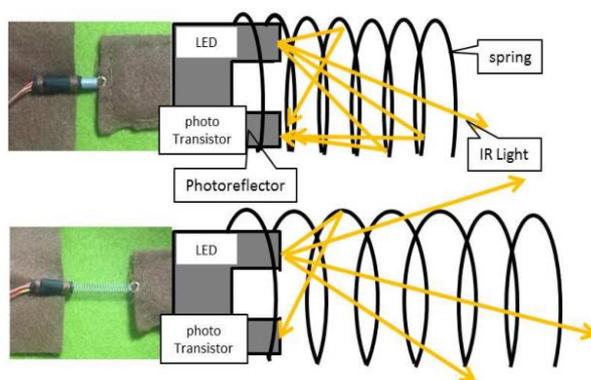


図 2-70^[109] ばねの伸びと漏れた光の量との関係

⑥表面の角度制御ができる卓球ラケット (ACTUATE Racket)

Masai らは、運動中にスポーツ用具を使ってスポーツ選手とインタラクトするための新しい方法として、表面の角度を変えることができる卓球ラケット「ACTUATE Racket」を開

発した^[110]。このラケットはその表面の角度を制御するために 2 つのサーボモーターを有する。ラケット上でボールをリズムカルにバウンスさせるというラケットスポーツのベーシックな活動の実践的な方法を検討し、ラケットで以下の 3 つのアプローチを提示した。

(i) 活動中に表面の角度を安定させる、(ii) ユーザーがボールをバウンスしている間、グリップ角度にかかわらずサーフェスの角度を増幅する、(iii) スイングごとにラケットの表面を意図的に変更して、ユーザーがその表面の角度を調整する必要があるようにする。このような装置を使って、どのようなスポーツ競技やトレーニングが生まれるかを検討している。

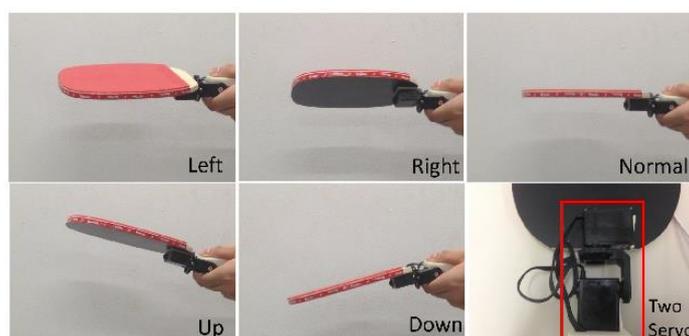


図 2-71^[110] 面角度の変わるラケット

(5) 坂本大介(北海道大学大学院情報科学研究科)に関する発展的研究

①モバイルデバイスにおける“fat finger problem”を回避するためのキャラクタナビゲーション(Fix and Slide)

モバイルデバイス上でテキストを選択する標準的な方法は、ユーザーが選択したいテキスト上の場所に直接接触れることであるが、これにはユーザーの指が選択領域を隠してしまうという問題がある。Suzuki らは、小さなモバイルデバイス上のキャラクタを移動するために可動の背景を使用するというコンセプトを提案した^[111]。ユーザーは画面をタップしてキャラクタを配置し、タッチおよびドラッグにより背景を移動する。この方法ではキャラクタは画面上に固定され、ユーザーは背景テキストをドラッグしてキャラクタをナビゲートする。この技術と iPhone のデフォルトの UI⁶⁶を比較したところ、参加者がこの技術をはじめて使用していたとしても、タスクの平均完了時間は、フォントサイズが小さい場合のデフォルトの UI と変わらないか、デフォルト UI よりもユーザービリティスコアが高くなった。

⁶⁶ User Interface の略。

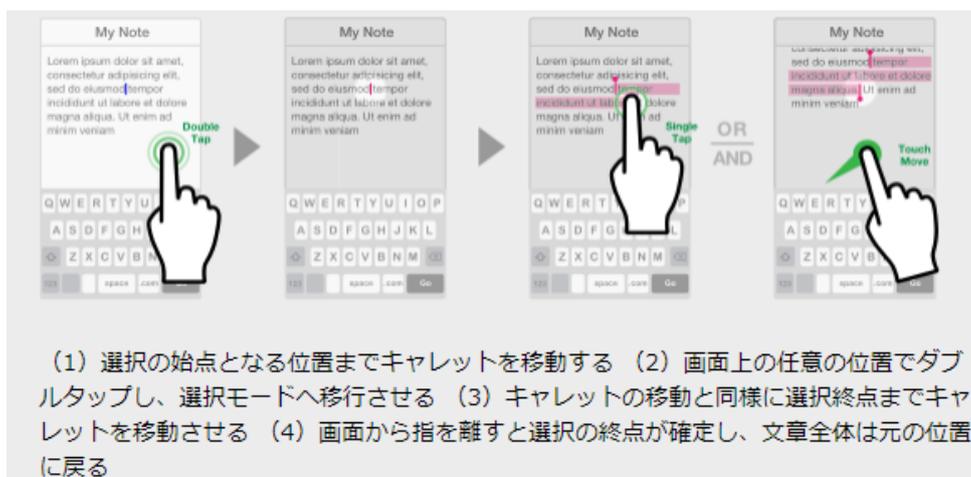


図 2-72⁶⁷ システムの説明

2.2.5 海外研究者のプロジェクト後の研究例

本プロジェクトに海外から参加した研究員のその後の研究の中から、研究者別にいくつかの事例を紹介する。

(1) Shengdong Zhao (在任期間：2008年4月～2009年3月)

①スケッチベースでアニメーションエフェクトをイラスト追加できるインタフェース (Draco)

アーティストやカジュアルなユーザーが豊富なアニメーションエフェクトを図面に追加しイラストを生き生きとさせることができるスケッチベースのインタフェース「Draco」を開発した^[112]。この手法は静止イラストのユニークな時間を超越した性質を維持しながら、連続的なアニメーション効果を提供するキネティックテキストチャーをベースにしたフレームワークである。これにより、泳いでいる魚の群れ、風に飛ばされる木の葉、池の水の波打ちなど、これまでのスケッチベースのツールでは難しかったり不可能だったりした多くのダイナミック効果が可能となった。プロのアニメーターやカジュアルユーザーを対象としたユーザー調査では、このツールが提供するさまざまなアニメーション、アプリケーション、および創造的な可能性が実証された。

⁶⁷ http://apps.yahoo-labs.jp/fix_and_slide/より引用。



図 2-73^[112] Draco のユーザーインターフェース：(a)メインキャンバス、(b)インタラクティブパッチ、(c) ツールパレット、(d)パラメーターのスライダーコントロール

②ウェアラブルなインタラクティブリングによる通知モードの比較研究(NotiRing)

瞬間的な通知チャンネル（光、振動、音、突き）と、5つのレベル（寝転がり、座り、立つ、歩き、走り）の身体活動の中に緩やかに上昇する温度（熱）のチャンネルについて、ウェアラブルなインタラクティブリング「NotiRing」の実証的な検討を行った^[113]。この結果、通知を伝達するための最も信頼性が高くかつ最も速いチャンネルは振動であり、次いで同様の通知性を共有する突きと音であることがわかった。これらの3つの経路の通知性は身体活動のレベルには影響されなかった。他の2つのチャンネル、光および熱は通知性が低く、身体活動のレベルに影響された。実験後の調査によれば、通知性はユーザーの好みに大きな影響を与えるが、各チャンネルにはさまざまな通知シナリオに適した独自の利点がある。



図 2-74^[113] (a) 光リングに接続したプロトタイプ；
(b) 光、音、振動、突きと温度のチャンネルをサポートする各リング。

(2) James Young（在任期間：2008年4月～9月）

①1人のオペレーターが遠隔ロボットのグループと対話できる革新的なインターフェース

遠隔ロボットチームとのリアルタイムの対話は、予測不可能な現実世界の環境の複雑さによって悪化する、人間とロボットの相互作用（HRI）の難しい問題である。多くの場合それを解決するには、オペレーターとロボットの望ましい比率よりも多いオペレーターに頼るという結果になる。そこで1人のオペレーターが遠隔ロボットのグループと対話するこ

とを可能にする革新的なインタフェースを提案した^[114]。卓上コンピュータを使用して、ユーザーは指を使う（タッチ）か、または物理的なおもちゃのセット（有形のユーザーインタフェース）を操作することによって、ロボットのグループを直接構成および操作できる。簡単な作業で小さなグループの遠隔ロボットと対話させるユーザー調査の結果、ユーザーはほとんどの点でおもちゃのインタフェースを強く支持した。



図 2-75^[114] (左)おもちゃのインタフェースを使った遠隔ロボットグループとインタラクトしているユーザー；(右)有形で触れて感じることでできるインタフェースと、それに対応するロボット

②動的でインタラクティブな触覚技術を組み込んだシンプルで安価なデバイス (Haptic Tabletop Puck)

日常生活では、実際のテーブル上のオブジェクトとのインタラクションには、我々の指先がそれらのオブジェクトをどのように感じるかが含まれる。これと比較して現在のデジタル対話型テーブルは、視覚的に何を提示しても同じ感触の均一なタッチ面を提示する。そこで、触覚インタラクションがデジタルテーブルトップ表面でどのように使用できるかを探究し、テーブルトップのインタラクションに動的でインタラクティブな触覚技術を組み込んだシンプルで安価なデバイス「Haptic Tabletop Puck」を開発した^[115]。ハプティック情報の視覚化、ハプティックグラフィカルインタフェース、およびコンピュータがサポートするコラボレーションの分野における触覚フィードバックを探索するいくつかのアプリケーションを作成した。特にデジタルオブジェクトの摩擦、高さ、質感、および展性と人間がどのように相互作用するかに焦点を当てた研究を行った。

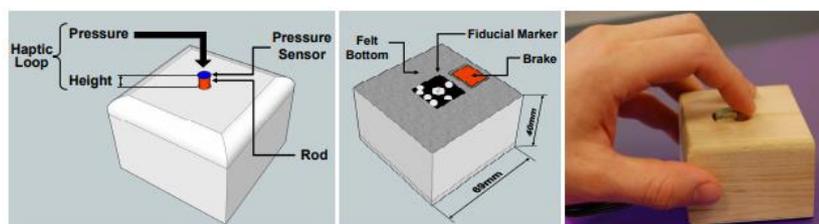


図 2-76^[115] (左) Haptic Tabletop Puck プロトタイプの日ャグラム；(中) その底面；(右) 外観写真

(3) Manfred Lau (在任期間：2009年8月～2011年4月)

①電子デバイスのエンクロージャの3次元形状の設計を容易にするためのインタフェース

電子デバイスのプロトタイプ作成に必要なエンクロージャ（または物理的なケース）の設計にかかわる問題について検討し、エンクロージャの3次元形状を設計するための足掛かりとして、電子部品を使用する新しいインタフェースを提案した^[116]。この問題のケーススタディとして、.NET Gadgeteer プラットフォーム⁶⁸を使用し、Gadgeteer コンポーネントのエンクロージャを設計するための概念実証システムを実装した。このシステムで設計および製作されたエンクロージャの例を示す。



図 2-77^[116] 3つの目覚まし時計はすべて同様の部品表を共有するが、形状と動作が異なる。(左)最も簡単な目覚まし時計を表すレンガのプロトタイプ；(中)アングルの付いたサイドパネルにボタンがあるプールエンクロージャ；(右)砂時計に意図的に似せたタイプ。回すことでスヌーズできる。

②パーソナルファブリケーション複合現実感環境(MixFab)

3次元プリンタやレーザーカッターなどのパーソナルファブリケーション用のマシンはますます普及している。しかし、制作するオブジェクトを設計するには、3次元モデリングのスキルが依然として必要であるが、これらの技術が広いユーザーグループにわたって普及することは遅れている。そこで、それらのユーザーのパーソナルファブリケーションに関わる障壁を低減させるための複合現実感環境「MixFab」を開発した^[117]。ユーザーは、没入型拡張現実環境でオブジェクトを設計し、直接ジェスチャーの方法で仮想オブジェクトとやり取りし、また、既存の物理オブジェクトを設計に容易に導入することができる。

⁶⁸ オープンソースのラピッドプロトタイピング用ツールキットであり、.NET Micro Framework と Visual Studio を用いて、小規模な組み込みシステムを製作することを主な目的としている。

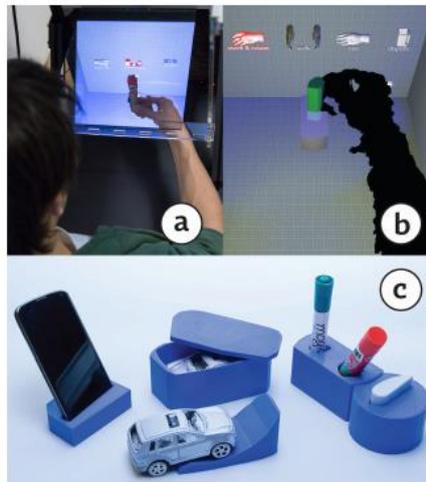


図 2-78^[117] (a) ユーザーが MixFab のプロトタイプシステムに物理的オブジェクトをかざしている、(b) ユーザーが仮想オブジェクトを操作しているスクリーン画像、(c) 本システムで作成された 3 次元プリントされたオブジェクト

(4) Yotam Gingold (在任期間 : 2008 年 4 月 ~ 9 月)

①3 次元キャラクターアニメーションパイプラインのモデリングとリギングステージを統合するアルゴリズムとユーザーインターフェース (RigMesh)

3 次元モデルの作成は、3 次元キャラクターのアニメーションパイプラインの最初の段階にすぎず、モデルが一旦作成されてもアニメーション化される前にそのモデルを動かす仕組みを作る必要がある。しかし、手作業によるリギング⁶⁹は面倒であり、自動リギングはリアルタイムでの変更分の更新はできない。このことは、リギングが実行された後にモデルの形状がしばしば変更される現実世界では障害となっている。新たに開発された「RigMesh」は、3 次元キャラクターアニメーションパイプラインのモデリングとリギングステージを統一する、スケッチベースの 3 次元モデリングのためのアルゴリズムとユーザーインターフェースである^[118]。このアルゴリズムは、スケッチされたパーツごとにリアルタイムでリグを作成し、パーツが合成または切り取られるとリグを更新する。その結果、ユーザーはベースシェイプ上を素早く反復しながら、その形やキャラクターを自由にポーズし、アニメーション化することができる。

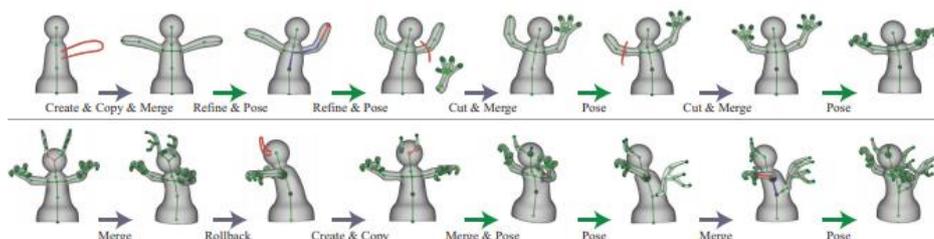


図 2-79^[118] RigMesh モデリングシーケンスの例 : アーティストは、モデル化 (青色の矢印) と

⁶⁹ リギング : アニメーターがキャラクターを動かすための仕組みを作ること。

本手法の骨格リグを使ったポーズ（緑色の矢印）によって形状についてのアイデアを試している。従来のパイプラインでは、モデリングとリギングは別々の手順であるため、形状が変更されるたびに（つまり、各モデリング操作後に）、モデルを再調整する必要がある。RigMeshはモデリングとリギングを統合し、モデルは常にリギングされ、アーティストは自由にポーズをとることができ、モデリング、変形、キーフレームのアニメーションを繰り返し、リアルタイムで行うことができる。

②困難な作業にマシンを利用して、スケッチから3次元オブジェクトをモデル化する方法

スケッチから3次元オブジェクトをモデリングすることは、セグメンテーション、認識、再構成を含むいくつかの困難な問題を必要とするプロセスである。これらのタスクのあるものは人間にはむずかしく、あるものはマシンにはむずかしい。問題の中核には、スケッチから形状のジオメトリを意味論的に理解する必要性がある。本研究では、人間にとっては非常に単純だがマシンにとっては非常に困難な意味タスクに対しては人間を利用し、人間にとってより困難な作業のためにはマシンを利用して、スケッチから3次元オブジェクトをモデル化する方法を提案した^[119]。ユーザーはスケッチの関連部分に特定の幾何学プリミティブを選択して配置することによって、認識とセグメンテーションを支援する。マシンはまず、その投影をスケッチ線にリアルタイムでフィッティングさせることにより、プリミティブをスケッチにスナップし、次に他の部分をリンクする幾何学的制約を推測することによって、モデルを全体的に改善する。

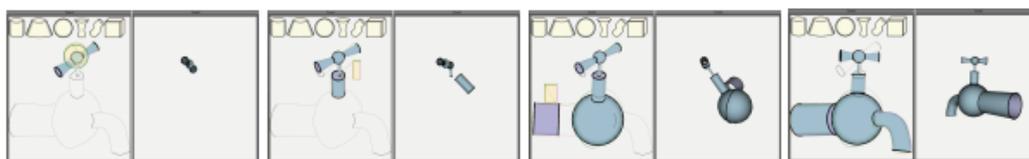


図 2-80^[119] モデラーは単に形状プリミティブを近似位置にドラッグ・アンド・ドロップし、システムはリアルタイムの正確な幾何学的スナップフィードバックを提供し、プリミティブ間の地理的制約を推定する。（合計モデリング時間：1分）

(5)Pranav Mistry(在任期間：2010年1月～3月)

①デジタルデバイス間でデータをシームレスに転送するインタラクションシステム (SPARSH)

楽しく直感的な方法で、デジタルデバイス間でのシームレスなデータ転送を行うための新しいインタラクションシステム「SPARSH」を開発した^[120]。ユーザーがデバイスからコピーしたいデータ項目に触れると、その時点でデータは実際にはクラウドに保存されるが、概念的にはあたかもそのユーザーの体に保存されるように見える。次にユーザーが保存(実際にはクラウドが保存)していたコンテンツをペーストしたい他のデバイスに触れると、コピーが完了する。このように「SPARSH」は、何をコピーしてどこに渡すかを示す指標としてタッチベースのやり取りを使用する。技術的には上記のように、データの実際の転送は情報クラウド(Cloud)を介して行われる。

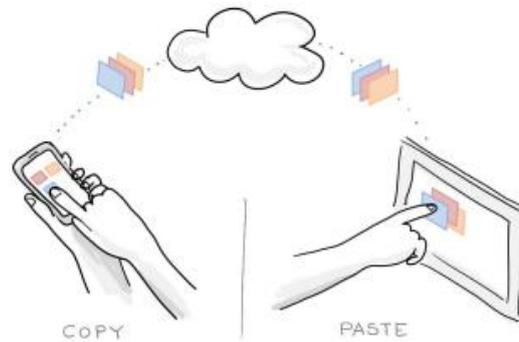


図 2-81^[120] SPARSH のコンセプト

(6) Daniel Saakes (在任期間 : 2011 年 8 月 ~ 2013 年 3 月)

① ポージングとアクティングを入力とした家具のパーソナライズ設計

デジタルファブリケーションは、ユーザーの仕様に合わせて製品をカスタマイズするためにますます実用的になってきている。しかし、そのためのデザインインターフェースは 3 次元モデリングにより重きを置き、オブジェクトをどのように使用するのか、またはオブジェクトをどのようにして身体にフィットさせるのかについてはあまり考慮されていない。そこで、家具をパーソナライズするための入力としてポージングとアクティングを使用する、ユーザー中心のアプローチを提案した^[121]。ユーザーは身体部分を参照し、また「この幅」や「ここからここへ」などの簡単な音声コマンドを使用して、腕を使って寸法を指し示しながら寸法を指定する。さらに、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) がリアルタイムでの即時フィードバックを提供し、ユーザーは仮想デザインをプロトタイプであるかのように体験し、評価することができる。

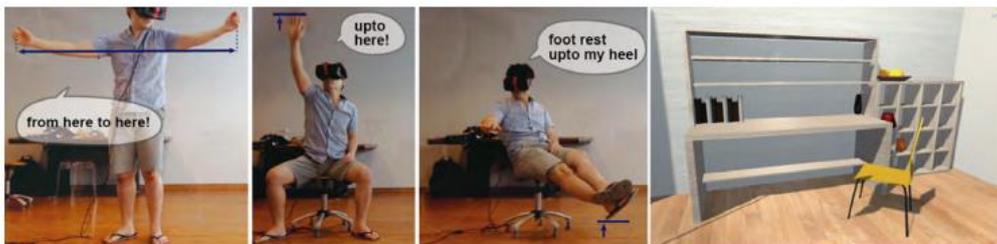


図 2-82^[121] 左からの 3 つで寸法などを指示。右はデザインの HMD による VR 画像。

② マジックミラーを装備したバーチャルフィッティングルーム (Mirror Mirror)

マジックミラーを装備したバーチャルフィッティングルーム (Mirror Mirror) は、ファッションアイテムの画像をマジックミラーに映ったユーザーに重ね合わせることによって、バーチャル試着をすることができる。本研究は、既存のファッションアイテムのミキシングとマッチングをサポートするだけでなく、ミラーの前で新しいアイテムをデザインし、なおかつ、そのデザインをファブリックプリンターにエクスポートすることを可能にしたシステムである^[122]。Mirror Mirror は、忠実度の高い 3 次元フィードバックを実現するた

めに、空間拡張現実 (Spatial Augmented Reality) ⁷⁰をマジックミラーと組み合わせた。ミラーの背後にあるディスプレイは、ユーザーがミラーを指しているときにユーザーインタフェースを表示し、仮想ボタンにより色を選択したりブラシを選択したりするなどの機能を使って自分の好みのアイテムをデザインすることができる。



図 2-83^[122] Mirror Mirror は、空間拡張現実とミラーディスプレイを組み合わせたデザインシステムである。仮想衣服は、鏡の反射 (a) と身体 (b) で見ることができる。マルチユーザーインタラクションもサポートされ (c、d)、デザインは簡単に印刷される (e)。

2.3 プロジェクト参加者の活動状況

本プロジェクトの研究者 (研究総括、研究推進委員、グループリーダー、研究員、客員研究員、技術員、時給技術員などを含む) は、期間中を通して 129 名であるが、そのうち主だったメンバーのプロジェクト終了直後の職位と現在の職位の動向について以下に示す。

研究総括とグループリーダー

- ・研究総括と映像表現グループのグループリーダーを兼務した五十嵐健夫は、東京大学大学院理工学系研究科コンピュータ科学専攻教授を現在も務める。
- ・生活デザイングループのグループリーダーの三谷純は、筑波大学大学院システム情報系情報工学域准教授から、教授に昇任した。
- ・ロボット行動グループの稲見昌彦は、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授から移籍し、現在東京大学先端科学技術研究センター教授を務める。

研究推進委員

- ・杉本麻樹は、慶應義塾大学理工学部情報工学科講師から准教授に昇任した。
- ・増井俊之は、慶應義塾大学大学院環境情報学部教授を現在も務める。
- ・樋口文人は、慶應義塾大学大学院環境情報学部非常勤講師を現在も務める。
- ・坂本大介は、研究推進委員就任時点 (2011 年 4 月) の東京大学大学院助教から、プロジェクト終了時まで同大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻特任講師に昇任、現在北海道大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻准教授を務める。
- ・石井健太郎は、東京大学大学院情報学環助教から、専修大学ネットワーク情報学部准教授に移籍した。

⁷⁰ HMD やウェアラブルディスプレイなどを装着せずにプロジェクトを用いて実対象の見かけを仮想対象と置き換える光投影手法 (プロジェクションマッピング)。

・米海鵬 (Haipeng Mi)は、東京大学大学院情報学環助教から移籍し、現在 AX-Studio Dept. of Info. Art & Design Academy of Arts & Design Tsinghua University, CHINA の Associate Professor を務める。

・中沢一雄は、国立循環器病センター室長から同センター医療情報部非常勤研究員となった。

研究員及び客員研究員

・福地健太郎は、明治大学特任准教授から、同大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻教授に昇任した。

・橋本直は、明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科講師から、同学科専任准教授に昇任した。

・渡邊恵太は、明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科講師から、同学科専任准教授に昇任した。

・Manfred Lau は、現在 School of Creative Media, City University of Hong Kong の Assistant Professor を務める。

・崔名傑(Myung Geol Choi)は、エジンバラ大学の研究員を経て、現在 Department of Media Technology and Content Technology, The Catholic University of Korea で Assistant Professor を務める。

・Daniel Saakes は、現在 Department of Industrial Design, Korea Advanced Institute of Science and Technology の Director を務める。

・三木優彰は、東京大学大学院情報理工学系研究科特任研究員から、現在東京大学建築学部博士研究員を務める。

・陳栢廷は、Autodesk Research⁷¹を経て現在 School of Software, University of Technology Sydney の Assistant Professor を務める。

・藤堂英樹は、CREST 研究員(計算錯覚学の構築(山口泰 G))を経て、現在中央学院大学現代教養学部助教を務める。

・梅谷信行は、東京大学大学院博士課程を修了し、現在東京大学大学院情報理工学系研究科講師を務める。

・杉浦裕太は慶應義塾大学大学院博士課程を修了し、現在慶應義塾大学理工学部情報工学科専任講師を務める。

・Shengdong Zhao は、現在 Department of Computer Science, School of Computing, National University of Singapore の Associate Professor を務める。

・James Young は、University of Manitoba の講師から、Associate Professor に昇任した。

⁷¹ 3D 技術を使ったデザイン・設計、エンジニアリング、エンターテインメント向けソフトウェア会社

- Yotam Gingold は、Department of Computer Science、George Mason University の助教から、Assistant Professor に昇任した。
 - Juncong Lin は、現在 Software School of Xiamen University の Professor を務める。
 - Greg Saul は、ビクトリア大学を卒業後、アメリカで Botto Studio を共同設立した。
 - Pranav Mistry は、マサチューセッツ工科大学博士課程を修了し、現在 Samsung 社の Global Senior Vice President of Research を務める。
 - Bo Zhu (朱博) は、上海交通大学修士課程を修了し、現在 Computer Science, Dartmouth College の Assistant Professor を務める。
 - Rubaiat Habib は、現在 Creative Intelligence Lab の Senior Research Scientist を務める。
 - Akki-Reddy CHALLA は、現在 Aerospace Sector, EON Reality の Director を務める。
 - Tang Kai-Tai は、School of Computing and Information Sciences at the Caritas Institute of Higher Education の講師を務める。
 - Li-feng Zhu は、東京大学大学院情報理工学系研究科特任研究員から、現在 University of Pennsylvania で Postdoctoral Researcher を務める。
 - Daniel Rea は、マニトバ大学修士課程を修了し、同大学博士課程に進学した。
 - Tabare A. Gowon は、ハーバード大学を卒業し、Dealer.com (Cox Automotive Inc.) でソフトウェアエンジニアとして勤務。
 - Andrei Ostanin は、ユタ大学を卒業し、LEOMO, Inc で Android Engineer として勤務。
 - Jordan Tewell は、City, University of London, United Kingdom の博士課程に在学。
 - Albert C. Chiou は、米国特許商標局 (USPTO) の特許審査官を務める。
 - Brandon T. Taylor は、カーネギーメロン大学の Human-Computer Interaction Institute で博士研究員を務める。
- その他の海外から参加の多くの研究員は、現況が不明である。

2.4 第2章のまとめ

本章ではプロジェクトの終了後の研究活動を、主だったメンバーの研究の中から本プロジェクト研究成果の発展と思われる研究に絞ってレビューした。表 2-7 に分野ごとの論文数を示した。

表 2-7 2章でレビューした各グループの研究件数

グループ	件数
五十嵐	29
三谷	19
稲見	8
若手研究者	15
渡邊	(4)
杉本	(4)

杉浦	(6)
坂本	(1)
海外研究者	11
合計	82

期間中の研究のうち約3分の1以上占めていたロボット行動グループのロボット操作や家電ロボットに関する研究は、プロジェクト終了後における調査対象とした研究者の研究にはほとんどなかった。このことに関してインタビューで稲見は、「期間中にやりつくしたという感があり、次の展開を探した。「自在化身体」⁷²自体は本プロジェクトで思いついたが、それをロボットそのものより自分の身体を自在化するという形にシフトした。このプロジェクトから出た、例えば明治大学の渡邊、橋本らのようにロボットを続けている研究者がおり、結果的に彼らに任せたとはいえる」と説明したが、これからわかるように、本プロジェクトから生まれたアイデアや考え方は、様々な形で受け継がれ広まっている。

一方、五十嵐グループと三谷グループの研究に医学分野に応用した発展研究がそれぞれ3件と2件あった。本プロジェクトは、「プロでない普通のユーザーが、3次元CGやアニメーションなどを駆使したメディア表現を行ったり、自分が使う衣服や家具などの道具をデザインしたり、ロボットの行動を自分用にデザインすることを可能にするための技術開発を行う」という考え方で進められたが、これに医学分野の専門家が協力し自分の領域における問題解決のために本プロジェクトでの成果を使って、新たな展開がなされた例である。

前章でレビューしたように、プロジェクト期間中の研究成果が生み出したのは、数多くの有形の「もの」と無形の「考え方」や「手法」である。例えば前者であれば特にロボット行動グループに見られるデバイス、後者であれば数々の物理学的手法を駆使した問題解決法や、具体的なロボットの操縦法などで、きわめて多岐にわたる。

これらの幅広いテーマにわたる研究全体を束ねるのは、「一般のユーザーが種々のものを自ら手軽にデザインできる新たなユーザーインタフェースの実現を目指す」という理念である。本プロジェクト終了後の研究をレビューすると、本プロジェクトに携わった研究者が終了後のそれぞれの立場でその理念をコアとしての研究を進めていることがわかる。それはグループリーダーのグループの活動に限らず、2.2.4項と2.2.5項で見たように、国内外の若手の研究者の新たな拠点を湧点とした研究にも同様に、本プロジェクトの思想をみることができる。

⁷² ERATO 稲見自在化身体プロジェクト：
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/17943235.html

第 3 章 プロジェクトの成果の波及と展望

3.1 科学技術への波及と展望

第 2 章のまとめにおいて述べたように、本プロジェクトによって生み出されたものは、新たな物質や新たな理論ではなく、「一般のユーザーが種々のものを自ら手軽にデザインできる新たなユーザーインタフェースの実現を目指す」という 1 つの理念をコアとした広範な研究の結果であり、プロジェクト終了後の研究として取り上げた 82 の研究のほとんどはその理念を共有している。

プロジェクト終了から 5 年たった今の時点で本プロジェクトの成果全体としてどのように科学技術に影響を及ぼしたかは、以下のように総括できる。

- ・曲面からなる 3 次元形状の CG 表現は、従来は非常に困難な作業のもとに実現されていたが、これを解決するための「スケッチや写真の 2 次元イメージから自由曲面の 3 次元モデリングを生成するシステムの開発」や「ボクセルモデルを自由形式の表面モデルに変換する方法」などの新しい CG デザインの方法論を提案した。

- ・一般のユーザーがあまり技術的な障壁を感じることなく使用できる、多くのデザイン手法を生み出した。その多くは、有限要素法などの物理ベースのシミュレーションをリアルタイムに併用しながら設計を改善していくインタラクティブなインタフェースデザインという新しい方法論である。デザイナーは形を考えることはできるが、それが物理的に可能かどうかわからない場合が多いので、これは重要な助けとなる。

- ・CG デザインが「スケッチによる流体システムの動的イラストレーションの開発」や「形状マッチングダイナミクスを使用した心拍動の視覚シミュレーション」など、医療分野への応用例で示されたように、アニメーションのみならず様々な分野で有効に使われるポテンシャルを持つことを実証された。

- ・「ユーザーの非明示的なロボット操作を実現するためのカードインタフェースを用いた方式の開発」や「デモンストレーションによるロボットの対話的動作のデザイン」など、人間の生活空間を主たる対象として、ロボットの行動をより直感的に教示し、プログラミングすることに主眼を置いたオリジナリティの高い方法論を提示した。

2017 年度に採択された CREST 研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開」、研究課題「データ駆動型知的情報システムの理解・制御のためのインタラクション」(2017~2022 年度、研究代表：五十嵐健夫)の研究概要によれば、本研究ではデータ駆動型知的情報処理システムを対象として、データの生成過程、学習プロセス、さらに学習した結果を利用する場面において、システムの中で何が起きているのか正しく可視化し、ユーザーによる適切な介入を可能とするためのインタラクション技術の研究開発を行うとのことである。ここでもユーザーを意識したヒューマンインタラクションを追求する研究者の姿が見える。

また、本プロジェクトの理念や成果を土台とした新しいプロジェクトが立ち上がってい

る。一つは総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）（2012年度～2014年度、代表者：稲見、柔軟物コンピューティング基盤の研究開発）であり、もう一つはERATO 稲見自在化身体プロジェクト（2017年10月～2023年3月、研究総括：稲見）である。稲見によれば、本プロジェクトの「ロボット行動」の研究では、プロジェクトの理念を「道具」に適用しそれを自在化するという考え方であったが、稲見自在化身体プロジェクトは「道具」から「身体」への発想の転換を行って、ロボットによる身体自在コントロールをテーマとしている。

3.2 社会経済への波及と展望

本プロジェクトは以下に示すように、個人が想像力を発揮できる社会の実現のためのビジュアルコミュニケーションやソフトウェアの技術基盤を創出、斬新なインタフェースを提示するなど、将来の情報通信技術に新たな局面を示した。

3.2.1 理念の伝播

一般のユーザーが扱いやすいユーザーインタフェースが重要であるという認識は、プロジェクトが開始された10年前に比べると、広くシェアされ、それが当たり前と思えるような世界に我々はいる。それが時代の流れであったという側面もあろうが、その流れの先鞭をつけたとも考えられよう。

例えば、YouTuber⁷³として動画配信・投稿を行うバーチャルアイドルを指すVtuber、あるいはバーチャルYouTuberは、「バーチャル」という語から分かるように、2Dもしくは3DCGなどのアバターを作成して配信しているのである。まさに、一般の個人が3次元モデルを使って動かす時代が到来している事例であり、「一般のユーザーが種々のものを自ら手軽にデザインできる新たなユーザーインタフェースの実現」を目指して開発されたアプリケーションのニーズがここにある。

デジタルファブリケーションは、レーザーカッターや3Dプリンタなどをコンピュータと接続し、3DCGなどのデジタルデータを木材、アクリルなどのさまざまな素材から切り出し成形する技術である。これらの工作機械が安価に手に入り、ものづくりの個人化が進む環境ができつつあるが、障害になるのが複雑なユーザーインタフェースであった。本プロジェクトは、示された研究成果について「自らデザインする」という体験を提供するための一般向けワークショップを開催し、「モノづくり」を研究対象とする研究者と、「モノづくり」に興味をもつユーザー層を結びつけるプラットフォームの創出に努めた。

「一般のユーザーが種々のものを自ら手軽にデザインできる新たなユーザーインタフェースの実現」を目指して開発されたアプリケーションと目されるものの1つに、Nintendo LABO⁷⁴があるが、それを動かすNintendo Switchには稲見らの出願した特開2016-16372「振

⁷³ YouTuber：主にYouTube上で独自に制作した動画を継続的に公開する人物を指す名称。

⁷⁴ Nintendo Labo：任天堂より2018年4月20日発売のNintendo Switch専用ゲーム及び周辺機器のシリ

動生成システム、振動生成装置、振動信号生成プログラム、および振動生成方法」が異例の速さで実用化、搭載されたという。

ペッパーやアイボのようなロボットは価格の問題もあり、なくても不自由はないと思うせいか、一般家庭への普及は限定的であるが、ルンバのように価格も手ごろで有れば便利というようなロボットが着実に増えている。このように必ずしも人型ではないロボットが生活にますます入り込んでくる社会が到来し、ヒューマンインタフェースが重要になってきている。

本プロジェクトでは日常生活における人間とロボットのインタラクションについて研究していたが、それは上記のような家庭におけるロボットとのインタラクションには限らない。数年前から世界的に競争が激化している自動運転車はまさにそのようなロボットであり、本プロジェクト終了後の成果の1つである「自動運転の車と歩行者との間のコミュニケーションのためのインタフェース」は、トヨタ自動車（株）との共同開発研究から生まれた。

3.2.2 ベンチャー事業

本プロジェクトでは期間中にいくつかの企業⁷⁵との共同開発が行われているが、具体的な商品化にはまだ時間がかかりそうである。一方、成果をベンチャー事業の形で世に出そうとする試みはいくつか見られるので、以下にレビューする。

(1) Sketch Chair : この研究を推進した Greg Saul がイギリスでデザインスタジオ “Diatom Studio” を立ち上げ、このシステムのビジネスを進めるための活動を行ったが、現在このデザインスタジオは存在せず、Sketch Chair by Diatom Studio の写真を掲載するサイト⁷⁶もあるが、カードボードで作られた椅子というだけで、一般消費者が自分で設計できるという記述はない。

(2) Ricecooker および Kapybara3D : とともに商用 CAD モデラー “Rhino” の Add-on である “Grasshopper” のカスタムコンポーネントとして、生活デザイングループが開発したもので、前者は連続体の大変形問題や張力構造の形状決定問題など、非線形性の強い力の釣り合いの問題を手軽に解くことを可能にし、後者は非可展面⁷⁷を平坦化する複数の手段を提供する。どちらもネットからダウンロードできる。

ーズ。Toy-Con と呼ばれる段ボールを素材としたコントローラーを自分自身で組み立て、それにスイッチ本体と Joy-Con をセットして新しいあそびが体験できる。

⁷⁵ アロカ（株）、パナソニック電工（株）、大日本印刷（株）など

⁷⁶ <http://getinterior.me/go/>

⁷⁷ 可展面とは、伸縮することなしに平面に展開することができる計量を持つ曲面である。すなわち平面を曲げたり切ったり丸めたりつなげたりすることで作ることでできる曲面である。

(3)Locomo(1.5.3(16)参照)：このマイコンボードは“工学ナビ”からの受託販売商品として市販されている⁷⁸。この“工学ナビ”というのは、開発メンバーだった橋本(現明治大学准教授)が運営しているサイト⁷⁹で、その説明に「作者がこれまで学んできたノウハウを多くの人に伝える目的で作られています。サイト名どおり工学系の大学生・高専生を対象とした内容となっています。主にC言語でのプログラミングを主軸に、拡張現実感や音声認識、画像処理などいろいろなテーマを取り扱っています。」とあるように、きわめて教育的な内容を公開している。

(4)シードルインタラクシオンデザイン株式会社：そのホームページ⁸⁰によれば、本プロジェクトをきっかけとした明治大学、慶應義塾大学、東京大学の、教員/研究員/学生による大学発ベンチャーとして、2014年5月に設立され、現在は文科省COIプロジェクトの社会実装を手がけながら、インターネット前提時代の人々の生活や社会に溶け込むプロダクト、ロボティクス、インタフェースデザイン、インタラクシオンデザイン技術開発をしているという。製品として2つ紹介されているうちの1つは、「ものごとく」という名前になっているが⁸¹、渡邊(現明治大学准教授、同社代表取締役も務める)らが開発した、SyncPresenter(1.5.3(15)参照)に他ならない。

(5)生活デザイングループのグループリーダーの三谷は、折り紙に関するソフトウェアのコア技術を生かして、2018年7月に筑波大学発のベンチャー企業の設立が認められ、8月にジオメトリックデザイン株式会社を発足させた。

3.2.3 人材の育成

本プロジェクトの最大の功績は、人材育成にあるということが、インタビューしたグループリーダー及び外部有識者の一致した意見であった。本プロジェクトでは外国からのポスドクの客員研究員だけでなく、多くの時給制研究補助員を雇用し研究を推進した。プロジェクト終了後の参加者の動静表で分かるように、彼らも含めてきわめて多くの若手研究者が、様々な場所で本プロジェクトの理念をベースとした研究を進めている。

さらに、2013年4月に新たに誕生した明治大学先端メディアサイエンス学科に、本プロジェクト出身者の福地、渡邊、橋本の3名が赴任したことが挙げられる。彼らはその学科の立ち上げの計画時点から主要メンバーとして参加しており、新たな場所で本プロジェクトの研究活動を発展させている。そこで研究を進めてきた今年の修士課程修了生の1人は、博士課程からドイツの情報科学技術分野では世界のトップクラスの Plattener Institute

⁷⁸ SWITCH SCIENCE 社 <https://www.switch-science.com/catalog/1693/>

⁷⁹ <http://kougaku-navi.net/about/index.html>

⁸⁰ <http://cidre.tokyo/cidre.html>

⁸¹ <http://cidre.tokyo/monotalk/index.html>

の研究室に行くことが決まっているという。

3.2.4 メディアを介した研究成果の発信

メディアを介した研究成果の発信では、プロジェクト期間中から立ち上げた JST の本プロジェクトのホームページ⁸²に研究成果が簡潔にまとめられており、それらの多くには研究発表会などのために制作したビデオへのリンクもあって、研究の概要が理解しやすくなっている。

また、JST の運営する日本科学未来館での各種イベントを通して、表 3-1 に示すような研究成果の発信を行っている。

表 3-1 日本科学未来館における関連イベント

年月日	イベント
2009/10/10	Miraikan 友の会で、小学生低学年向けに「オリジナル風船の制作」のワークショップを開催
2009/12/13	Miraikan 友の会と共催で、「デザイン椅子制作」のワークショップを開催
2010/3/13	友の会ウィーク (3/13 - 22) に、生活デザイングループで研究開発したデザインシステムのデモと制作物を出展
2010/8/4	“Walky” がインタラクティブ東京 2010 (科学未来館、8 月 24-25 日) に招待展示された
2010/11/28	Miraikan 友の会と共催するワークショップ「新規ソフトウェアモニター体験・オリジナルランプシェードをデザインしよう!」を開催
2011/3/11	インタラクシオン 2011 で、“Magic Cards”：紙カードを利用したロボットとのインタラクシオン、を発表
2011/3/11	インタラクシオン 2011 で、“TouchMe”：CG 重量表示を用いたロボットの直接操作方法、を発表
2011/6/11	メディアラボ第 9 期展覧会「もんもとすむいえ」で、「ロボット行動デザイングループ」を中心とする展示がスタート (12/27 まで)
2011/7/23	第 1 回公開シンポジウム「デザインのためのインタフェース」を開催
2011/9/2	メディアラボで展示中の“CRISTAL”がテレビ朝日の「さきっちょ」で放映
2011/11/30	メディアラボで展示中の“Cooky”をNHK 教育テレビ「大!天才てれびくん」で放映
2013/2/28	インタラクシオン 2013 で、「複数ダミーカーソル中における自分自身のカーソル特定」を発表
2013/2/28	インタラクシオン 2013 で、「光入出力可能な布状インタフェースの提案」を発表

2011 年 6 月から約半年にわたって開催されたメディアラボ第 9 期展覧会「もんもとすむいえ」は、本プロジェクトの成果の中から特に子供たちが身近に感ずることのできるテーマを選んで、ロボットたちと当たり前と一緒に生活する未来がきたとき、それらのロボットにどうやって指示を出すのか、またそれらのロボットからどうやって情報を受け取るのかといった問題をわかりやすく理解させることを目的とした展示である。実際の家を模した設備の中に、AirSketcher, CastOven, Cooky, CRISTAL, Push-Pins, RoboJockey, Snappy, TouchMe, Walky という 9 つの研究成果を展示し、来場者が実際に未来のライフ・スタイル

⁸² <http://www.jst.go.jp/erato/igarashi/>

や最先端の HCI 研究について触れる機会を提供し好評を得た。

表 3-2 に、グループリーダー名で検索した調査の結果から、本プロジェクトに関係あると思われる記事を抽出した結果を示す。記事とのつながりを示すために、該当するグループリーダー名にチェックを入れた。

表 3-2 メディアで報道された本プロジェクトの成果

年月日	メディア	報道タイトル	グループリーダー		
			五十嵐	三谷	稲見
2008/3/4	ITmedia News	文字入力だけで 3D アニメを作成・共有できる「Anime de Blog」	✓		
2009/3/31	日刊工業新聞	東大と筑波大、試作なしでバランス玩具作成できるツール開発	✓	✓	
2009/5/8	日刊工業新聞	筑波大、立体折り紙を簡単に設計できるツール開発		✓	
2009/5/18	ワールドビジネスサテライト	<トレンドたまご>立体折り紙		✓	
2009/5/22	日経産業新聞	モップかけて、近寄るな、カードで掃除ロボ操作——東大、家事向けに実用化へ。	✓		
2009/5/29	エムデータ TV ウォッチ	<トレンドたまご>置くだけで動く「マジックカード」	✓		
2009/8/12	日刊工業新聞	モノづくり“パーソナル化”／デザイン・設計一貫ツール、21 型模索		✓	
2009/8/14	日刊工業新聞	筑波大、鉄琴を自由な形に作れるデザインツール開発	✓	✓	
2009/9/4	日刊工業新聞	慶大、簡単な指示で洗濯物畳む小型ロボシステムを開発	✓		✓
2009/9/24	日刊工業新聞	筑波大、アルミ風船を自由にデザイン—設計ツール開発	✓	✓	
2009/12/8	CNET Japan	「いいソフトがなかったので自分で作りました」—うるまでのび作のアニメ作成ソフト「PICMO」完成	✓		
2009/12/21	日本情報産業新聞	手軽にアニメ制作、初心者でも描ける機能満載、うるまでのび	✓		
2010/5/13	日経産業新聞	タッチパネルで TV・照明 ON、卓型統合リモコン、東大がシステム、感覚的に操作。	✓		✓
2010/5/17	日経 MJ(流通新聞)	紙が折りなす不思議アート——手作り本人気・講座も開設 (プームの裏側)		✓	
2010/5/31	日本経済新聞 朝刊	「こんなぬいぐるみ作りたい…」、パソコンで作画、型紙を連動作製、東大がソフト。	✓	✓	
2010/6/3	日刊工業新聞	茨城県工業技術センター、3D 折り紙ソフトで商品開発研究会		✓	

年月日	メディア	報道タイトル	グループリーダー		
			五十嵐	三谷	稲見
2010/7/22	日経産業新聞	壁のスイッチ、家電も操作、東大が新システム、目印付け替え直感的に。	✓		✓
2010/8/7	日刊工業新聞	慶大と東大、複数ロボが協調し調理手伝うロボシステム開発	✓		✓
2010/8/18	日経産業新聞	チンする間、扉に CM、東大がシステム、ネットにも接続。	✓		✓
2010/9/3	日経産業新聞	東大・慶大、2 足ロボ、“指人形”で操作、タッチパネルで自在に。	✓		✓
2010/9/8	茨城新聞朝刊	筑波大准教授三谷氏が開発 県内 6 社が研究会折り紙ソフトで新商品を		✓	
2011/2/11	日経産業新聞	模擬実験ソフト、建材の形変え強度計算、東大が開発——建造物設計に応用。	✓		
2011/5/9	日刊工業新聞	東大など、複雑工具も目的地まで搬送するロボシステムを開発	✓	✓	
2011/5/26	日刊工業新聞	筑波大、開くと飛び出すカードの作成ツール開発—初心者でも簡単作成		✓	
2011/8/10	日経産業新聞	カードで向き・強さ指示、「賢い扇風機」で好みの風、東大試作、パターンも記憶。	✓		✓
2011/10/13	日刊工業新聞	東大、型紙作成ツール開発—服着た状態シミュレーション	✓	✓	
2011/10/27	日経産業新聞	手描き入力→自動で型紙、木製イス、簡単に設計——筑波大が立体化ソフト。	✓	✓	
2011/11/24	日刊工業新聞	東大など、3D 形状データ基に家具の作り方表示できるツール開発	✓	✓	
2011/12/9	日経産業新聞	筑波大など設計用ソフト、オリジナル本棚やポットの蓋、写真に書き込み簡単作製。	✓	✓	
2011/12/13	日刊工業新聞	慶大、クッションやソファを簡単に力センサー化する技術開発	✓		✓
2012/2/16	日経産業新聞	タッチパネルでロボ操作、実物画像に CG 重ねる、東大など、直感的な手法開発。	✓		✓
2012/3/2	茨城新聞朝刊	けいざいトレンド 3D 折り紙商品に 県内企業が連携、開発紙トレーや寝具のばね		✓	
2012/3/31	日本経済新聞電子版ニュース	CG やナノテク、伝統工芸に新風 複雑な作品が身近に		✓	
2012/3/31	日本経済新聞 夕刊	先端技術、伝統工芸に新風、複雑な作品、身近に——鎌倉彫×CG、折り紙ソフト。		✓	
2012/4/26	日刊工業新聞	筑波大、複雑なビーズ細工を簡単にするデザインツール	✓	✓	
2012/5/16	日経産業新聞	タッチパネルでロボ操縦、東大がシステム、連続動作を簡単指示。	✓		

年月日	メディア	報道タイトル	グループリーダー		
			五十嵐	三谷	稲見
2012/8/23	日経産業新聞	お気に入りの品、手軽に、CG 画像から家具作り、筑波大、分解図作製ソフト。	✓	✓	
2013/7/20	NHK ニュース	折り紙技術の実用化 地図・レジャーシート・衛星太陽電池パネルなどに		✓	
2013/8/14	日刊工業新聞	変わるユーザーインターフェースー生活に溶け込むコンピューター			✓
2013/9/20	日刊工業新聞	五十嵐プロなど、温度変化で何回でも製品模様を変えられるプリンター開発	✓		✓
2013/10/17	東京読売新聞 夕刊	[駆ける] 3次元CGを手軽に 五十嵐健夫氏	✓		
2013/12/20	日経産業新聞	マウスに代わる入力用装置、指で肌押し機器操作、慶大、赤外線センサーで測定。			✓
2014/1/6	日経エレクトロニクス	解説ー触る所のすべてに タッチ・パネルーペン入力、触覚、大型化で未開拓用途に広がる			✓
2014/5/13	CNET Japan	疲労や眠気を見える化するメガネ「JINS MEME」ー目の動きでスマホも操作			✓
2014/5/13	ITmedia ニュース	常時アイトラッキングで「自分を見る」眼鏡「JINS MEME」 疲れや眠気を可視化、API 公開で開発オープンに			✓
2014/5/14	日本経済新聞電子版ニュース	「疲れや眠気が見える」メガネの JINS が新端末			✓
2014/5/14	朝日新聞朝刊	疲れ測るメガネ、JINS が開発 目の動き追いデータ送信			✓
2014/5/14	日刊工業新聞	ジェイアイエヌ、メガネにセンサー機能「JINS ミーム」発売ー疲労・眠気を計測			✓
2014/5/15	日刊工業新聞	深層断面／“働くメガネ”可能性拓くーウェアラブル業務用で普及期待			✓
2014/5/26	日経エレクトロニクス	NE レポートーメガネメーカーが示した “本当”のウェアラブルー普通の外観・装着感で、眼電位から眠気・視線を検知			✓
2014/5/26	日経バイオテク	疲れと眠気を測る JINS アイウェアが 2015 年春登場、東北大や慶大、芝浦工大と共同開発、運転サポートはデンソーも			✓
2014/6/2	日経 MJ (流通新聞)	視線など検知、「自然な眼鏡」、ジェイアイエヌが次世代商品、教育分野にも活用期待、授業への集中度測定など。			✓
2014/7/14	日刊工業新聞	東大、落書きの飛行機を飛ばしやすいデザインに調整できるソフト開発	✓		
2014/7/23	日刊工業新聞	東大、タブレット端末使い塗り絵感覚で店舗内照明の明るさ調整できるシステム開発	✓		✓
2014/9/4	日刊工業新聞	慶大、カーペットや服に文字・絵を表示できる描画装置開発ー超音波で毛並み整形			✓
2014/10/13	朝日新聞朝刊	(科学の扉)折り紙が技術を変える 宇宙・医療・建築…広がる応用＝訂正あり		✓	

年月日	メディア	報道タイトル	グループリーダー		
			五十嵐	三谷	稲見
2014/11/7	NHK ニュースおはよう日本	<けさの知りたい！>進化するおりがみ・おりがみの可能性		✓	
2014/12/22	日経エレクトロニクス	論文タッチの次に来る UI 自在化で人の能力拡張			✓
2015/1/25	日本経済新聞 朝刊	折り紙工学、世界が注目——医療や宇宙開発で活躍（日曜版）		✓	
2015/4/23	茨城新聞朝刊	ひときらり 折り紙研究に取り組む筑波大教授 三谷純（みたにじゅん）さん（39）		✓	
2015/4/29	茨城新聞朝刊	記者手帳 関税引き下げなら死活問題（「折り紙にコンピューター技術を取り入れること自体が珍しい」）		✓	
2015/7/9	日経プレスリリース	大日本印刷と筑波大、安価で臓器立体模型を3Dプリンターで作製する手法を開発		✓	
2015/7/14	QLifePro 医療ニュース	安価で内部構造が見やすい臓器立体模型を3Dプリンターで作製—筑波大とDNP		✓	
2015/8/19	めざましテレビ	<MORESEVEN>紙1枚で完成！立体折り紙アート		✓	
2015/11/10	北国新聞朝刊	◎折り紙の可能性を探る 金沢市で「ミウラ折り」体験 北陸先端大シンポ		✓	
2016/7/5	NHK 総合・ニュースシブ5時	<シブ5時総合研究所>知られざる折り紙のチカラ		✓	
2016/7/18	日本情報産業新聞	スマートデバイスの普及で進化する AR/VR システム、最新の技術を紹介、HMD の体験ブースも、インテリジェンス			✓
2016/7/22	日刊工業新聞	東大、脳血管の立体画像を簡単作成できるソフト開発—CT データ使い、作業時間半減	✓		
2016/9/26	AREA	タービン回して微生物を活用！？ ネタバレ注意！ シン・ゴジラを生物学的に検証		✓	
2016/11/16	日刊工業新聞	東大など、柔軟に心臓モデル生成—CT から直接 3D 変換、手術前シミュレーションに	✓		
2016/11/27	日本経済新聞 朝刊	折り紙、科学・工学でも脚光（かがくアゴラ）		✓	
2016/11/28	日刊工業新聞	落書きが竹とんぼに—東大、羽根を飛ぶ形に自動修正するシステム開発	✓		
2016/12/1	日経サイエンス	シン・ゴジラの科学		✓	
2016/12/1	日経サイエンス	折り紙で解くシン・ゴジラ		✓	
2017/2/19	東京読売新聞 朝刊	[サイエンス View] 医療も宇宙も 折り紙で		✓	
2017/2/26	朝日新聞朝刊	（ひらけ！進路・新路・針路）数学から生まれる複雑な立体 え！？これが折り紙？		✓	
2018/1/31	朝日新聞朝刊	立体折り紙、芸術の域 曲線・ねじり…多様で複雑 筑波大・三谷純教授が考案／茨城県		✓	

年月日	メディア	報道タイトル	グループリーダー		
			五十嵐	三谷	稲見
2018/2/24	日本経済新聞電子版セクション	折り紙、すごいぞ！ 地図や飲料缶、技術生かすー建築や医療にも応用模索		✓	
2018/8/9	日本経済新聞電子版	東大と JST、持ち運び可能な高出力のロッド状触覚デバイスを開発			✓
2018/8/9	日本経済新聞電子版	東大・慶大など、ロボットヘッドとロボットアーム搭載の遠隔共同作業システム「Fusion」を開発ー複数人で動作・技能共有			✓
2018/8/17	日刊工業新聞	慶大と東大、遠隔二人羽織ロボ開発 視界共有で共同作業			✓
2018/8/28	日経産業新聞	「2羽織」で遠隔操作、東大・慶大、装着型ロボ開発。			✓

【引用文献】

- [1] Gingold Y., Igarashi T., Zorin D., “Structured Annotations for 2D-to-3D Modeling”, *In Proceedings of the ACM SIGGRAPH ASIA 2009, Journal ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(5), 148, Dec. (2009)
- [2] Sasaki N., Chen H.-T., Sakamoto D., Igarashi T., “Facetons: Face Primitives with Adaptive Bounds for Architecture Building in Virtual Environment”. *In Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '13)*. 77-82, ACM, Oct. 6-9 (2013)
- [3] Igarashi T., Mitani J., “Apparent Layer Operations for the Manipulation of Deformable Objects”, *ACM Transactions on Graphics, In Proceedings of the SIGGRAPH 2010*, 29(4), 110 (2010)
- [4] Choi M.G., Yang K., Igarashi T., Mitani J., Lee J., “Retrieval and Visualization of Human Motion Data via Stick Figures”, *The 20th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2012)*, 31(7), 2057-2065, Hong Kong, Sep. 12-14 (2012)
- [5] Choi M.G., Noh S.-T., Komura T., Igarashi T., “Dynamic Comics for Hierarchical Abstraction of 3D Animation Data”, *The 21st Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2013)*, 32(7), 1-9, Oct 7-9, Singapore (2013)
- [6] Kazi R.H., Igarashi T., Zhao S., Davis R.C., “Vignette: Interactive Texture Design and Manipulation with Freeform Gestures for Pen-and-ink Illustration”, *The 30th international conference on Human factors in computing systems (CHI 2012)*, 1727-1736, Austin, Texas, May 5-10 (2012)
- [7] Zhu B., Iwata M., Haraguchi R., Ashihara T., Umetani N., Igarashi T., Nakazawa K., “Sketch-based Dynamic Illustration of Fluid System”, *ACM Transactions on Graphics, 30(6), 134, Proceedings of SIGGRAPH Asia 2011*, Hong Kong, Dec. 13-15 (2011)
- [8] Mattausch O., Scherzer D., Wimmer M., Igarashi T., “Tessellation-independent smooth shadow boundaries”, *Computer Graphics Forum*, 31(4), 1465-1470 (2012)
- [9] Umetani N., Takayama K., Mitani J., Igarashi T., “A responsive finite element method to aid interactive geometric modeling”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 31(5), 5453327 (2011)
- [10] Ribeiro A., Igarashi T., “Sketch-Editing Games: Human-Machine Communication, Game Theory and Applications”, *The 25th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2012)*, 287-298, Cambridge, MA, USA, Oct. 7-10 (2012)
- [11] Willis K.D.D., Lin J., Mitani J., Igarashi T., “Spatial sketch: Bridging between movement & fabrication”, *Proceedings of the 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI'10)*, 5-12 (2010)
- [12] Lau M., Ohgawara A., Mitani J., Igarashi T., “Converting 3D Furniture Models to Fabricatable Parts and Connectors”, *ACM Transactions on Graphics*, 30(4), 85 (2011)
- [13] Umetani N., Kaufman D.M., Grinspun E., Igarashi T., “Sensitive couture for interactive garment modeling and editing”, *ACM Transactions on Graphics*, 30(4), 90 (2011)

- [14] Wibowo A., Sakamoto D., Mitani J., Igarashi T., “DressUp: A 3D Interface for clothing design with a physical mannequin” , *Proceedings of the 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI 2012*, 99–102 (2012)
- [15] Furuta Y., Umetani N., Mitani J., Igarashi T., Fukui Y., “A Film Balloon Design System Integrated with Shell Element Simulation” , *The 31st annual conference of the European Association for Computer Graphics (EUROGRAPHICS 2010)*, shot paper, May 3–7 (2010)
- [16] Lau M., Saul G., Mitani J., Igarashi T., “Modeling-in-Context: User Design of Complementary Objects with a Single Photo” , *Proceedings of the Eurographics Symposium on SBIM 2010*, 17–24, June (2010)
- [17] Umetani N., Mitani J., Igarashi T., “Designing Custommade Metallophone with Concurrent Eigenanalysis” , *New Interfaces for Musical Expression++ (NIME++)*, June (2010)
- [18] Furuta Y., Mitani J., Igarashi T., Fukui Y., “Kinetic art design system comprising rigid body simulation” , *Computer-Aided Design and Applications*, 7(4), 533–546 (2010)
- [19] Umetani N., Igarashi T., Mitra N.J., “Guided exploration of physically valid shapes for furniture design” , *ACM Transactions on Graphics*, 31(4), 86 (2012)
- [20] Umetani N., Koyama Y., Schmidt R., Igarashi T., “Pteromys: Interactive Design and Optimization of Free-formed Free-flight Model Airplanes” , *ACM Transactions on Graphics, Proceedings of SIGGRAPH*, 33(4), 65 (2014)
- [21] Zhu L., Igarashi T., Mitani J., “Soft folding” , *Computer Graphics Forum*, 32(7), 167–176 (2013)
- [22] Mitani, J., “A method for designing crease patterns for flat-foldable origami with numerical optimization”, *Journal for Geometry and Graphics*, 15(2), 195–201 (2011)
- [23] Saul G., Lau M., Mitani J., Igarashi T., “SketchChair: An all-in-one chair design system for end users” , *Proceedings of the 5th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI’11)*, 73–80 (2011)
- [24] Lau M., Hirose M., Ohgawara A., Mitani J., Igarashi T., “Situating Modeling: A shape-stamping interface with tangible primitives” , *Proceedings of the 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI 2012)*, 275–282 (2012)
- [25] Zhao S., Nakamura K., Ishii K., Igarashi T., “Magic Cards: Using Paper Tags to Support Task-Centric Human-Robot Interaction” , *In Proceedings of the 27th ACM/IEEE Conference on Human-Robot Interaction (CHI2009)*, 173–182, April (2009)
- [26] Sakamoto D., Honda K., Inami M., Igarashi T., “Sketch and run: A stroke-based interface for home robots” , *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, 197–200, (2009)
- [27] Ishii K., Zhao S., Inami M., Igarashi T., Imai M., “Designing laser gesture interface for robot control” , *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5727 LNCS(PART 2), 479–492 (2009)
- [28] Hashimoto S., Ishida A., Inami M., Igarashi T., “TouchMe: An augmented

- reality interface for remote robot control” , *Journal of Robotics and Mechatronics*, 25(3), 529-537 (2013)
- [29] Shirokura T., Sakamoto D., Sugiura Y., Ono T., Inami M., Igarashi T., “RoboJockey: Real-time, simultaneous, and continuous creation of robot actions for everyone” , *Adjunct Proceedings of the 23rd ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2010)*, 399-400 (2010)
- [30] Young J.E., Ishii K., Igarashi T., Sharlin E., “Style by Demonstration: Teaching Interactive Movement Style to Robots” , *Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI2012)*, Lisbon, Portugal, Feb. 14-17, 41-50 (2012)
- [31] Sugiura Y., Sakamoto D., Withana A., Inami M., Igarashi T., “Cooking with robots: Designing a household system working in open environments” , *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2427-2430 (2010)
- [32] Seifried T., Rendl C., Perteneder F., Leitner J., Haller M., Sakamoto D., Kato J., Inami M., Scott S.D., “CRISTAL, control of remotely interfaced systems using touch-based actions in living spaces” , *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2009*, 6 (2009)
- [33] Watanabe K., Kamiyama Y., Monjo T., Matsuda S., Inami M., Igarashi T., “AirSketcher: Direct air instruction techniques for electric fans” , *Computer Software*, 29(4), 316-323 (2012)
- [34] Watanabe K., Sato A., Matsuda S., Inami M., Igarashi T., “smoon: A Spoon with Automatic Capacity Adjustment” , *Proceedings, Laval Virtual 2012 France (VRIC 2012)*, March (2012)
- [35] 橋本 直、盧承鐸、山中太記、神山洋一、稲見昌彦、五十嵐健夫, 「Lighty: ロボティック照明のためのペインティングインタフェース」, 第20回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2012), 25-30 (2012)
- [36] Kakehi G., Sugiura Y., Withana A., Lee C., Nagaya N., Sakamoto D., Sugimoto M., Inami M., Igarashi T., “FuwaFuwa: Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement” , *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies, SIGGRAPH'11*, 5 (2011)
- [37] Sugiura Y., Lee C., Ogata M., Withana A., Makino Y., Sakamoto D., Inami M., Igarashi T., “PINOKY: A ring that animates your plush toys” , *The 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2012) - Proceedings*, 14 (2012)
- [38] Sugiura Y., Inami M., Igarashi T., “A thin stretchable interface for tangential force measurement” , *UIST'12 - Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 529-536 (2012)
- [39] 渡邊恵太、鈴木涼太、神山洋一、稲見昌彦、五十嵐健夫, 「SyncPresenter: 動きと音声同期したターンテーブル型プレゼンテーションシステム」, 情報処理学会・インタラクティブ2013, 日本科学未来館, 488-489 (2013)
- [40] Silva P., Rungjiratananon W., Elcott S., Driancourt R., Igarashi T., “Constraint-based wrinkle simulation in texture space” , *Proceedings - SCA 2015: 14th ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, 194 (2015)
- [41] Nakashima K., Igarashi ST., “Extraction of a smooth surface from voxels preserving sharp creases” , *ACM SIGGRAPH 2015 Posters, SIGGRAPH 2015*, a4

- (2015)
- [42] Seki, S., Igarashi T., "Sketch-based 3D hair posing by contour drawings", *Proceedings - SCA 2017: ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*, a29 (2017)
 - [43] Sato T., Wojtan C., Thuerey N., Igarashi T., Ando R., "Extended Narrow Band FLIP for Liquid Simulations", *COMPUTER GRAPHICS FORUM*, 37(2), 169-177 (2018)
 - [44] Noh S.T., Igarashi T., "Retouch transfer for 3D printed face replica with automatic alignment", *Proceedings of Computer Graphics International Conference (CGI'17)*, Part F128640, a24 (2017)
 - [45] Miki M., Igarashi T., Block P., "Parametric self-supporting surfaces via direct computation of airy stress functions", *ACM Transactions on Graphics*, 34(4), 89 (2015)
 - [46] Nakashima K., Auzinger T., Iarussi E., Zhang R., Igarashi T., Bickel B., "CoreCavity: Interactive Shell Decomposition for Fabrication with Two-Piece Rigid Molds", *ACM Transactions on Graphics* 37(4), 135:1-135:13, (SIGGRAPH 2018) (2018)
 - [47] Koyama Y., Sueda S., Steinhardt E., Igarashi T., Shamir A., Matusik W., "AutoConnect: Computational design of 3D-printable connectors", *ACM Transactions on Graphics*, 34(6), 231 (2015)
 - [48] Suzuki R., Igarashi T., "Collaborative 3D modeling by the crowd", *Proceedings of the 43th Graphics Interface Conference*, 124-132 (2017)
 - [49] Ijiri T., Ashihara T., Umetani N., Koyama Y., Igarashi T., Haraguchi R., Yokota H., Nakazawa K., "Visual simulation of cardiac beating motion with shape matching dynamics", *Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering*, 53(3), 130-137 (2015)
 - [50] Igarashi T., Shono N., Kin T., Saito T., "Interactive volume segmentation with threshold field painting", *UIST 2016 - Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'16)*, 403-413 (2016)
 - [51] Nakashima K., Koyama Y., Igarashi T., Ijiri T., Inada S., Nakazawa K., "Interactive Deformation of Structurally Complex Heart Models Constructed from Medical Images", *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Eurographics 2016*, Short Papers (2016)
 - [52] Yoda N., Igarashi T., "Decomposition of 32 bpp into 16 bpp textures with Alpha", *ACM SIGGRAPH 2015 Posters*, SIGGRAPH 2015, a33 (2015)
 - [53] Suzuki R., Sakamoto D., Igarashi T., "Annotone: Record-time audio watermarking for context-aware video editing", *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'15)*, 2015-April, 57-66 (2015)
 - [54] Wang F., Nagano H., Kashino K., Igarashi T., "Visualizing video sounds with sound word animation", *Proceedings - IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2015-August, 7177422 (2015)
 - [55] Fan Y., Yoda N., Igarashi T., Ma H., "Path-based image sequence interpolation guided by feature points", *Proceedings - International Conference on Image Processing*, ICIP, 2016-August, 7532421 (2016)
 - [56] Koyama Y., Sakamoto D., Igarashi T., "Selph: Progressive learning and support of manual photo color enhancement", *Conference on Human Factors*

- in Computing Systems (CHI'16) - Proceedings*, 2520–2532 (2016)
- [57] Sato T., Igarashi T., Batty C., Ando R., "A Long-term semi-lagrangian method for accurate velocity advection", *SIGGRAPH Asia 2017 Technical Briefs*, SA 2017, 5 (2017)
 - [58] Hu S., Zhang Z., Xie H., Igarashi T., "Data-driven modeling and animation of outdoor trees through interactive approach", *Visual Computer*, 33(6-8), 1017–1027 (2017)
 - [59] Koyama Y., Sato I., Sakamoto D., Igarashi T., "Sequential Line Search for Efficient Visual Design Optimization by Crowds", *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), 48 (2017)
 - [60] Ibayashi H., Sugiura Y., Sakamoto D., Miyata N., Tada M., Okuma T., Kurata T., Mochimaru M., Igarashi T., "Dollhouse VR: A multi-view, multi-user collaborative design workspace with VR technology", *SIGGRAPH Asia 2015 Posters*, SA 2015, a24 (2015)
 - [61] Yoshida H., Igarashi T., Obuchi Y., Takami Y., Sato J., Araki M., Miki M., Nagata K., Sakai K., Igarashi S., "Architecture-scale human-assisted additive manufacturing", *ACM Transactions on Graphics*, 34(4), 88 (2015)
 - [62] López, D., Charbel H., Obuchi Y., Sato J., Igarashi T., Takami Y., Kiuchi T., "Human touch in digital fabrication", *ACADIA 2016: Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines - Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 382–393 (2016)
 - [63] Nakamura M., Koyama Y., Sakamoto D., Igarashi T., "An Interactive Design System of Free-Formed Bamboo-Copters", *Computer Graphics Forum (Pacific Graphics 2016)* (2016)
 - [64] Xie H., Igarashi T., Miyata K., "Precomputed panel solver for aerodynamics simulation", *ACM Transactions on Graphics*, 37(2), 17 (2018)
 - [65] Fang N., Xie H., Igarashi T., "Selfie guidance system in good head postures", *CEUR Workshop Proceedings*, 2068 (2018)
 - [66] Fukahori K., Sakamoto D., Igarashi T., "Exploring subtle foot plantar-based gestures with sock-placed pressure sensors", *The 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2015–April, 3019–3028 (2015)
 - [67] Chang C.-M., Toda K., Sakamoto D., Igarashi T., "Eyes on a car: An interface design for communication between an autonomous car and a pedestrian", *AutomotiveUI 2017 - 9th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Proceedings*, 65–73 (2017)
 - [68] Sugiura Y., Toda K., Kikuchi T., Hoshi T., Kamiyama Y., Igarashi T., Inami M., "Grassffiti: Drawing method to produce large-scale pictures on conventional grass fields", *TEI 2017 - Proceedings of the 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 413–417 (2017)
 - [69] Aoki H., Mitani J., Kanamori Y., Fukui Y., "AR based ornament design system for 3D printing", *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(1), 47–54 (2015)
 - [70] Imai T., Kanamori Y., Mitani J., "Real-time screen-space liquid rendering with complex refractions", *Computer Animation and Virtual Worlds*, 27(3–4),

- 425-434 (2016)
- [71] Wang P., Kanamori Y., Endo Y., Mitani J., "Body-shape transfer for super deformation of 3D character models", *Proceedings - 2017 NICOGRAPH International, NICOInt 2017*, 8047395 (2017)
 - [72] Iizuka S., Endo Y., Kanamori Y., Mitani J., "Single image weathering via exemplar propagation", *Computer Graphics Forum*, 35(2), 501-509 (2016)
 - [73] Endo Y., Kanamori Y., Mitani J., "Deep reverse tone mapping", *ACM Transactions on Graphics*, 36(6), a177 (2017)
 - [74] Oshiro Y., Yano H., Mitani J., Kim S., Kim J., Fukunaga K., Ohkohchi N., "Novel 3-dimensional virtual hepatectomy simulation combined with real-time deformation", *World Journal of Gastroenterology*, 21(34), 9982-9992 (2015)
 - [75] Oshiro Y., Mitani J., Okada T., Ohkohchi N., "A novel three-dimensional print of liver vessels and tumors in hepatectomy", *Surgery Today*, 47(4), 521-524 (2017)
 - [76] Zhao Y., Sugiura Y., Tada M., Mitani J., "InsTangible: A tangible user interface combining pop-up cards with conductive ink printing", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10507 LNCS, 72-80 (2017)
 - [77] Igarashi Y., Igarashi T., Mitani J., "Computational design of iris folding patterns", *Computational Visual Media*, 2(4), 321-327 (2016)
 - [78] Zhang M., Igarashi Y., Kanamori Y., Mitani J., "Component-based building instructions for block assembly", *Computer-Aided Design and Applications*, 14(3), 293-300 (2017)
 - [79] Zhang M., Igarashi Y., Kanamori Y., Mitani J., "Designing mini block artwork from colored mesh", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9317 LNCS, 3-15 (2017)
 - [80] Endo Y., Iizuka S., Kanamori Y., Mitani J., "DeepProp: Extracting deep features from a single image for edit propagation", *Computer Graphics Forum*, 35(2), 189-201 (2016)
 - [81] Igarashi Y., Mitani J., "Patchy: An interactive patchwork design system", *ACM SIGGRAPH 2015 Posters, SIGGRAPH 2015*, a10 (2015)
 - [82] Kanamori Y., Yamada H., Hirose M., Mitani J., Fukui Y., "Image-based virtual try-on system with garment reshaping and color correction", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9550, 1-16 (2016)
 - [83] Kase Y., Kanamori Y., Mitani J., "A method for designing flat-foldable 3D polygonal models", *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 5B-2015 (2015)
 - [84] Miyamoto E., Endo Y., Kanamori Y., Mitani J., "Semi-Automatic Conversion of 3D Shape into Flat-Foldable Polygonal Model", *Computer Graphics Forum*, 36(7), 41-50 (2017)
 - [85] Zhao Y., Kanamori Y., Mitani J., "Geometry of axisymmetric 3D origami consisting of triangular facets", *Journal for Geometry and Graphics*, 21(1), 107-118 (2017)
 - [86] Zhao Y., Kanamori Y., Mitani J., "Design and motion analysis of axisymmetric 3D origami with generic six-crease bases", *Computer Aided Geometric Design*,

- 59, 86–97 (2018)
- [87] Matsukawa Y., Yamamoto Y., Mitani J., "Enumeration of flat-foldable crease patterns in the square/diagonal grid and their folded shapes", *Journal for Geometry and Graphics*, 21(2), 169–178 (2017)
- [88] Hirose M., Sugiura Y., Minamizawa K., Inami M., "PukuPuCam: A recording system from third-person view in scuba diving", *ACM International Conference Proceeding Series*, 11, 161–162 (2015)
- [89] Withana A., Koyama S., Saakes D., Minamizawa K., Inami M., Nanayakkara S., "RippleTouch: Initial exploration of a wave resonant based full body haptic interface", *ACM International Conference Proceeding Series*, 11, 61–68 (2015)
- [90] Yamamoto M., Hanamitsu N., Kim H., Minamizawa K., Inami M., "Dramagic: A sound animation table to enhance imagination", *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference (VRIC'16)*, 11 (2016)
- [91] Gu H., Sanchez S., Kunze K., Inami M., "An augmented e-reader for multimodal literacy", *UbiComp and ISWC 2015 – Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 353–356 (2015)
- [92] Masai K., Sugiura Y., Ogata M., Kunze K., Inami M., Sugimoto M., "Facial expression recognition in daily life by embedded photo reflective sensors on smart eyewear", *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings (IUI'16)*, March 07–10, 317–326 (2016)
- [93] Ishimaru S., Kunze K., Tanaka K., Uema Y., Kise K., Inami M., "Smart eyewear for interaction and activity recognition", *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 18, 307–310 (2015)
- [94] Kunze K., Masai K., Inami M., Sacakli O., Liwicki M., Dengel A., Ishimaru S., Kise K., "Quantifying reading habits – counting how many words you read", *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2015)*, 87–96 (2015)
- [95] Sasaki T., Saraiji M.H.D.Y., Fernando C.L., Minamizawa K., Inami M., "MetaLimbs: Metamorphosis for multiple arms interaction using artificial limbs", *ACM SIGGRAPH 2017 Posters, SIGGRAPH 2017*, a55 (2017)
- [96] Chita E., Kunze K., Sugiura Y., Inami M., Hashimoto S., Ogata M., "Silhouette interactions- using the hand shadow as interaction modality", *UbiComp and ISWC 2015 – Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 69–72 (2015)
- [97] Yoshimura, K., Watanabe, K., "WireMolding: 3D modeling approach involving molding with wire", *Proceedings of the 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2017)*, 375–379 (2017)
- [98] Katakura S., Watanabe K., "Proto hole: Prototyping interactive 3D printed objects using holes and acoustic sensing", *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, April, LBW11 (2018)
- [99] Kono T., Watanabe K., "Filum: A sewing technique to alter textile shapes", *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface*

- Software and Technology (UIST 2017)*, 39-41 (2017)
- [100] Sato A., Watanabe K., Rekimoto J., "MimiCook: A cooking assistant system with situated guidance", *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI 2014)*, 121-124, 2014
 - [101] Hiroi Y., Obata K., Suzuki K., Ienaga N., Sugimoto M., Saito H., Takamaru T., "Remote welding robot manipulation using multi-view images", *Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2015)*, 7328078 (2015)
 - [102] Maeda, N., Sugimoto M., "Pathfinder vision: Tele-operation robot interface for supporting future prediction using stored past images", *ACM SIGGRAPH 2014 Posters (SIGGRAPH 2014)*, 52 (2014)
 - [103] Kikuchi T., Hiroi Y., Smith R.T., Thomas B.H., Sugimoto M., "MARCUT: Marker-based laser cutting for personal fabrication on existing objects", *Proceedings of the 10th Anniversary Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction (TEI 2016)*, 468-474 (2016)
 - [104] Koshiyama R., Kikuchi T., Morita J., Sugimoto M., "VolRec: Haptic display of virtual inner volume in consideration of angular moment", *ACM International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, Proceeding Series*, 16-19 November, 32 (2015)
 - [105] Furui N., Suzuki K., Sugiura Y., Sugimoto M., "SofTouch: Turning soft objects into touch interfaces using detachable photo sensor modules", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10507 LNCS, 47-58 (2017)
 - [106] Sugiura Y., Nakamura F., Kawai W., Kikuchi T., Sugimoto M., "Behind the palm: Hand gesture recognition through measuring skin deformation on back of hand by using optical sensors", *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE 2017)*, 2017-November, 1082-1087 (2017)
 - [107] Kikuchi T., Sugiura Y., Masai K., Sugimoto M., Thomas B.H., "EarTouch: Turning the ear into an input surface", *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (Mobile HCI 2017)*, 27 (2017)
 - [108] Ko S., Itoh Y., Sugiura Y., Hoshi T., Sugimoto M., "Spatial calibration of airborne ultrasound tactile display and projector-camera system using fur material", *Proceedings of the 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2017)*, 583-588 (2017)
 - [109] Shimazaki A., Sugiura Y., Mikami D., Kimura T., Sugimoto M., "MuscleVR: Detecting muscle shape deformation using a full body suit", *Proceedings of the 8th Augmented International Conference (AH'17)*, 15 (2017)
 - [110] Masai K., Sugiura Y., Sugimoto M., "ACTUATE racket: Designing intervention of user's performance through controlling angle of racket surface", *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference (AH'17)*, doi.org/10.1145/3041164.3041200 (2017)
 - [111] Suzuki K., Okabe K., Sakamoto R., Sakamoto D., "Fix and slide: Caret navigation with movable background", *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST'15 Adjunct)*. 79-80 (2015)

- [112] Kazi R.H., Chevalier F., Grossman T., Zhao S., Fitzmaurice G., "Draco: Bringing life to illustrations with kinetic textures", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'14)*, 351-360 (2014)
- [113] Roumen T., Perrault S.T., Zhao S., "NotiRing: A comparative study of notification channels for wearable interactive rings", *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'15)*, April, 2497-2500 (2015)
- [114] Guo C., Young J.E., Sharlin E., "Touch and toys: New techniques for interaction with a remote group of robots", *Proceedings of the 27th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'09)*, 491-500 (2009)
- [115] Marquardt N., Nacenta M.A., Young J.E., Carpendale S., Greenberg S., Sharlin E., "The Haptic Tabletop Puck: Tactile feedback for interactive tabletops", *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS 2009)*, 85-92 (2009)
- [116] Christian W., Lau M., Gellersen H., "Enclosed: A component-centric interface for designing prototype enclosures", *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction Workshop on personal and pervasive fabrication (TEI 2013)*, 215-218 (2013)
- [117] Weichel C., Lau M., Kim D., Villar N., Gellersen H., "MixFab: A mixed-reality environment for personal fabrication", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'14)*, 3855-3864 (2014)
- [118] Borosán P., Jin M., DeCarlo D., Gingold Y., Nealen A., "RigMesh: Automatic rigging for part-based shape modeling and deformation", *ACM Transactions on Graphics*, 31(6), 198 (2012)
- [119] Shtof A., Agathos A., Gingold Y., Shamir A., Cohen-Or D., "Geosemantic snapping for sketch-based modeling", *Computer Graphics Forum*, 32(2 PART2), 245-253 (2013)
- [120] Mistry P., Nanayakkara S., Maes P., "Touch and copy, touch and paste", *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2011)*, 1095-1098 (2011)
- [121] Lee B., Cho M., Min J., Saakes D., "Posing and acting as input for personalizing furniture", *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction (NordCHI'16)*, 23-27 October, a44 (2016)
- [122] Saakes D., Yeo H.-S., Noh S.-T., Han G., Woo W., "Mirror Mirror: An on-body T-shirt design system", *Proceedings of the 2016 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'16)*, 6058-6063 (2016)