



研究者のモノづくり

—インタラクション研究のための段階別プロトタイピング—

神山洋一

(慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科)

研究視点でのモノづくり

研究を遂行する上で、プロトタイプする機会は数多くある。IT領域、とりわけHCI (Human Computer Interaction) の分野では、人とコンピュータのインタラクションという言葉化が困難な対象を扱うため、物理的なプロトタイプを作ることが、研究の最終段階に限らず、その推進の過程でも重要である。筆者はこれまで、科学技術振興機構 ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科といった大学・研究機関にて、特にインタラクション研究における実験装置の回路・機構の設計・実装などのモノづくりに取り組んできた。なお、筆者は研究を主体的にディレクションする立場ではなく、研究者と協力してアイデアの検証や実装方法の提案を行うことが主であったため、意図を的確にプロトタイプに反映させることを重視してきた。

本稿では、筆者のこれまでのプロトタイピング経験から、インタラクション研究にかかわるモノづくりを行う上でのさまざまなポイントを紹介する。

研究段階別のプロトタイピング

研究を遂行する上で、プロトタイプを作る機会は多数あるが、大きく以下の段階に分けられる。

- ・ Step 1：ファーストプロトタイプ：システムの本質的な体験を検討するため
- ・ Step 2：動作検証プロトタイプ：システムの実現に必要な電気・機構面の設計を検証するため
- ・ Step 3：体験検証プロトタイプ：ユーザ評価実

験等でシステムの効果を実証するため

- ・ Step 4：ファイナルプロトタイプ：システムを長期的にデモンストレーションするため

それぞれの段階で作るプロトタイプには、求められる完成度や作成に費やせる時間に制約がある。さらに、プロトタイプの「耐久性 (想定寿命)」も考えておくことが重要である。本章では、それぞれの段階でどのような「作り方」を実践することで、こうした制約条件をクリアしていくかを議論する。

なお、最終的に製品を目指して研究することもあるが、大量生産などの、製品化する上での工業的な制約などを考慮した設計を最初から考える必要はないと考える。こうしたことを初段階から考えた場合、プロトタイプのスピード感を失い、必要な専門知識も膨大となるからである。大量生産に向けた設計は、アイデアの面白さが検証できた上で、経験のある企業の専門家とコラボレーションをするべきだと思う。

◎ファーストプロトタイプ

アイデアは頭の中では無限に湧き出てくるが、それを具体化したときに、本当に想像通りの体験を提供できるのかは分からない。そのため、アイデアを立体物として制作することで、一人称として、体験できるカタチにし、検討する。この際、イメージスケッチやCGを描いて考えることもできるが、手に取って一人称として体験することで考えがまとまることや、まったく違った仕組みを思いつくことがあるため、実際のスケールに合わせたファーストプロトタイプを作ることは重要なプロセスである。

このファーストプロトタイプは、他者に体験を共有する上でも効果的である。自身に向けたものと他

者に向けたプロトタイプは、少し作るべきものも異なる点に注意したい。自身では、頭の中にすでにイメージができていたため、本質的な部分のプロトタイプがあれば、そのほかの細かい要素は頭で補完できてしまう。他人の場合は、そのイメージが共有されていないため、前提条件や周辺要素の部分もプロトタイプするか、イメージを共有できるような補足資料（映像や文章）を用意する必要がある。

図-1 に、コンピュータ上でデザインした絵柄をカーペット上に描画できるローラー型デバイス「Graffiti Fur」¹⁾ のファーストプロトタイプとファイナルプロトタイプを示す。

ファーストプロトタイプの製作期間はおおむね半日程度で、耐久性は体験時に（その場で）動作すれば良い。ただし、壊れた場合もモノ自体やその体験方法を振り返ることができるように、写真や動画は必ず記録しておく。

◎動作検証のためのプロトタイプ

体験の本質的な部分が検証できたら、次に具体的なシステム設計に入る。ここでは、(1) その体験を実現するためにどのような物理 UI が必要なのか、(2) その物理 UI の実現のためにはどういった機構が必要なのか、(3) その機構にはどのような制御が必要なのか、を検証するためのプロトタイプ制作を進める。

構成要素の設計

ファーストプロトタイプの体験を再現するために必要な構成要素を選定する。

まずは、

- ・ センサ類
- ・ アクチュエータ（DC モータ・サーボモータ等）
- ・ 表示装置（LED やディスプレイ等）

を最初に選定する。これらの部品は体験に直結する性能（精度やトルク、表示領域）を持ち、それによって物理的なサイズが変わるためである。

次に、

- ・ マイコン類（Arduino・mbed や AVR・PIC）
- ・ アクチュエータの動作回路部品

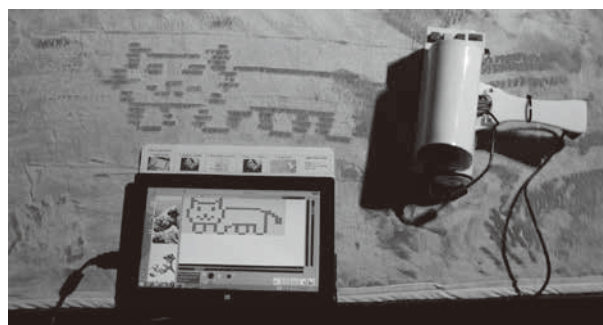
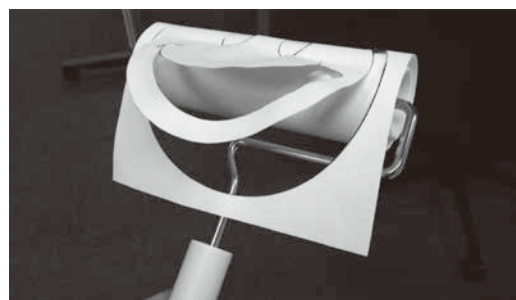


図-1 Graffiti Fur のファーストプロトタイプ（図上）
ファイナルプロトタイプ（図下）

を選定する。ここでは、制御回路を内蔵するか否かで選択肢が変化する。制御回路を内蔵するとサイズが大きくなりすぎて体験が損なわれる場合は、外付けでも構わない。内蔵の場合にはマイコンボードではなくチップ単体を用いることもある。

最後に、

- ・ 機構部品の選定と設計

を行う。電子部品の選定と設計がすべて完了したところで機構部分と外装の設計を行い、プロトタイプを組み立てる。

組立てと再設計

次に、前項で見積もった部品を組立て、プログラミングを行い動作を検証する。この段階ではシステムが意図通り動かずに部品選定をやり直すことが考えられる。この場合に変更を容易にするために、センサ・アクチュエータ以外の電気回路・マイコン類は、（たとえ最終的に内蔵する想定で設計していても）外付けにして検証する。特に、モータ等の動きを伴う装置では組み上げてみることで初めてイメージ通りの動作をしているかが分かる。

ファーストプロトタイプでは、実際のスケールを合わせて制作することの重要性を主張したが、動作検証のためのプロトタイプでは、多少のスケールの

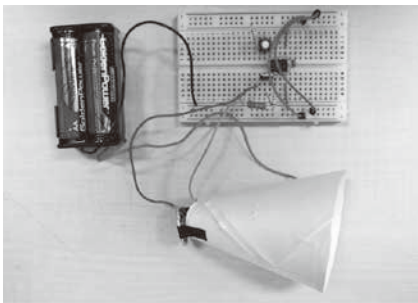


図-2 「不思議なライト」の動作検証プロトタイプ(図上)ファイナルプロトタイプ(図下)

インタラクティブ映像展示「不思議なライトで伊能図を見てみよう」
監修：東京国立博物館 制作：凸版印刷(株)・慶應義塾大学

変更は容認できる。なぜならば、理想的なサイズにするためには、多くの場合、それ専用センサ、アクチュエータ、マイコン、回路設計を行う必要があり、市場に出回る汎用的な部品の組合せでは実現困難だからである。それよりも、きちんとシステムとして動作することを優先する。

この段階の初期では、回路はブレッドボード等を用いて試行錯誤しながら構築する。図-2に、大型ディスプレイとインタラククションするための懐中電灯型デバイス「不思議なライト」²⁾の動作検証プロトタイプとファイナルプロトタイプを示す。

ただし、ブレッドボードで構成された回路は貧弱であり、少しの衝撃で前の動作の再現ができなくなる場合もある。よって、最低限の動作検証が完了し部品選定が終わった段階で、回路をシステムに内蔵しない場合であっても、必ず回路を基板化することが重要となる(図-3)。

動作検証プロトタイプの製作期間はおおむね1カ月程度で、設計段階に1週間、最低限の組立てとプログラミングで1週間、その結果の検証や部品の再選定・基板化等に2週間程度必要である。この段階では、研究室等の全体ミーティングで数回は披露して議論できるように、システムが1カ月程度は安定動作するように設計する。

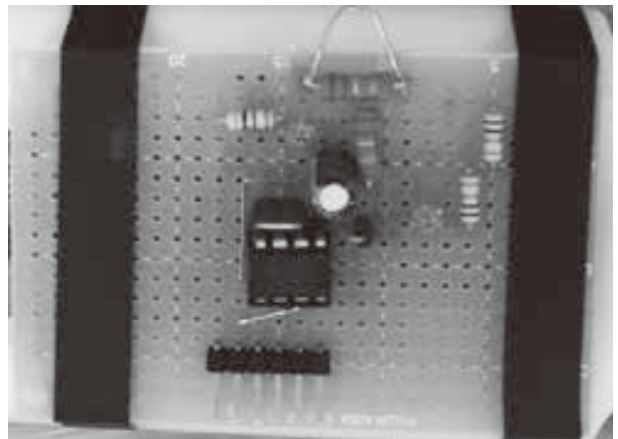


図-3 図-2のブレッドボードを基板化した様子

◎体験検証プロトタイプ

動作検証の段階では、ユーザの体験を考慮せずに、システムが動作することを目的として実体化した。しかし、インタラクション研究の本来の目的はユーザの体験を向上させるものである。よって、次のステップでは、他者にシステムを体験してもらい、フィードバックを得て、論文執筆やシステムの改善に繋ぐことを目的とする。

基本的な構成は前節の動作検証プロトタイプの発展型だが、この体験検証プロトタイプを用いてシステムの写真やビデオの撮影を行うことになるので、機構部分のサイズや外観デザインをアイディアスケッチに近づけられるようバランスをとることが重要である。

ユーザの体験を通してリアクションを抽出し、システムをチューニングしていく上で重要なことは、システムの透明化である。インタラクション分野でのシステムは体験を提供するための手段である。逆にいえば、システムの使い勝手等に違和感があると本質的な体験が阻害されてしまう。こうした違和感をなくすためには丁寧な調整が必要となる。たとえば、図-4は、前述の不思議なライトの動作検証プロトタイプにおけるグリップ部である。ここでは、厚さ数mmの差で持ちやすさが変わり、大きく体験の質に影響するため、何度も作り変えて検証した。

体験検証プロトタイプの段階では、実際の想定ユーザや利用状況においての実証が開始される。そのためモノを輸送することも多いので、壊れにくく、



図4 体験検証プロトタイプでの作りこみの一例、グリップ部の厚みを数 mm 単位で変えて検証した

修理しやすい設計が重要である。また、修理や複数台作成も考慮し、組立ての手間が少なくなるよう配慮する。なお、作成台数が5～10台以上と多くなるときは作成時間の短縮や部品の安定供給のために電子基板や機構部分の外注も検討する。

体験検証プロトタイプの製作期間は、構造や台数に応じて大きく異なるが、最短3週間から最長2カ月程度必要となる。設計の改善には変更箇所に応じて2週間から1カ月程度、実装には作成台数に応じて1週間から1カ月程度必要になる。耐久性としては、長期間の評価実験も考慮し、数カ月程度は安定稼働することを目指す。

◎ファイナルプロトタイプ

ファイナルプロトタイプは、評価実験や論文化を経て、いつでも人に体験してもらえることを目標とし、その名の通り研究目的としては区切りとなるモノとなる。さまざまな人に見てもらおう・触ってもらおうモノなので、中身だけでなく外装もしっかりと仕上げる必要がある。特に人間が直接触れる部分は、3Dプリンタやアクリル加工で造形したままとせず、しっかり研磨・塗装を行う。この最終的な仕上げ方法は次章で詳しく紹介する。

ファイナルプロトタイプは、さまざまな展示会への遠距離移動や、展示会や研究室での常時展示&実演に備えて、耐久性を第一で設計する。また、安定動作と保守性を重視して、市販部品を積極的に利用する。たとえば、図-5に示す不思議なライトのファイナルプロトタイプでは、バッテリーを乾電池から

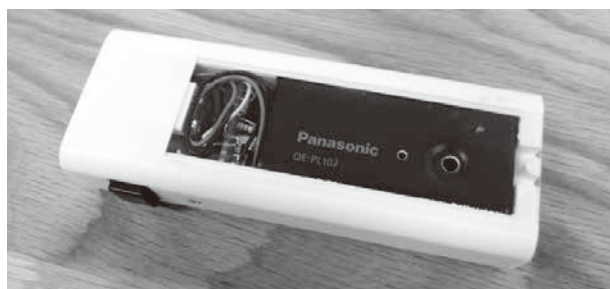


図5 ファイナルプロトタイプの一例、安定動作のため市販部品を積極的に用いる

市販の非接触給電可能なモバイルバッテリーに変更している。これらの部品はディスコン等に備えて、使用量の倍以上を購入してストックする。

ファイナルプロトタイプの製作期間は、部品の安定供給や頑丈さを見越した再設計に1週間から2週間、実装に2週間から1カ月程度必要になる。耐久性は、既存の設計で数年程度は稼働できるように配慮する。

製品に近づける仕上げ技術

ここでは、筆者が特にファイナルプロトタイプの製作で培ってきた3Dプリンタやレーザカッターを用いたプロトタイプ技法について説明する。3Dプリンタにより専門的な知識や大型で高価な工作機械がなくとも個人レベルでモノづくりを通じた表現が可能になったが、一般的なABS樹脂を積層するタイプの3Dプリンタに2つの課題があると考えられる。それは、「出力物の強度」と「外観仕上げ」である。まず、出力物の強度が金属等よりも大幅に低く、特にインタラクティブ・システムの機構部品としてそのまま利用することは難しい。しかし、造形を工夫することで十分な強度を確保することができる。外観仕上げについても、そのままでは出力物の積層パターンが目立ってしまうが、出力後に仕上げ加工を行うことで、製品のような外観に近づけることができる。本章では、これらの実践的なテクニックを紹介する。

◎強度を保つ設計テクニック

積層方向の調整

一般的な溶融樹脂積層方式の3Dプリンタの出力

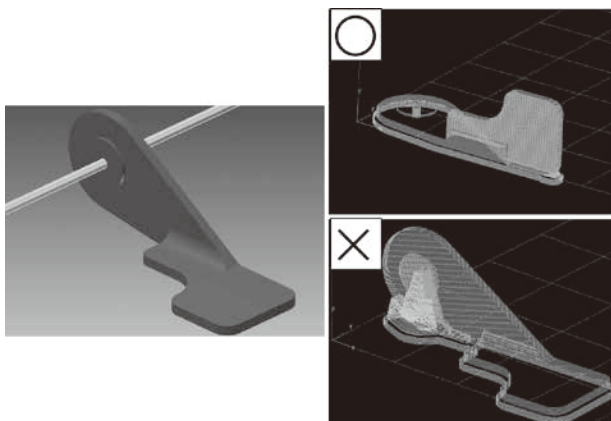


図-6 3Dプリンタの積層方向を考慮した出力例。右下は力のかかる向きに積層するため剥離しやすい

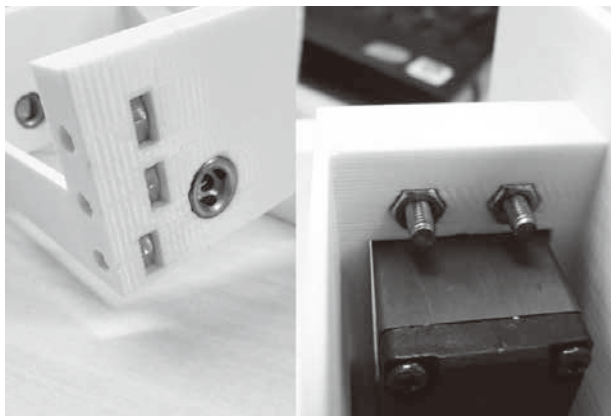


図-7 ネジ/ナットを用いたパーツ間の固定方法

物には平面方向と高さ方向で強度が違い、平面方向の方が強い特徴がある。よって、せん断力を受ける部分が平面方向になるように造形データを配置して出力することが重要になる(図-6)。

部品の分割

3Dプリンタを用いると複雑な形状を一度に作るができるが、場所により力のかかる方向が異なるため、一体成型することで強度が落ちてしまう場合がある。そのため、部品を分割して、加わる力方向に合わせて、積層方向を調整して出力する。分割したパーツはアクリル用接着剤を用いることで、強固に接着することができる。また、分割することで出力時間の短縮につながるメリットもある。

ネジ/ナットの活用

組立てやメンテナンスの目的でパーツ分割を行った場合、パーツ同士はネジを用いて固定することが多い。ただし、セルフタッピングビスやタップ加工で直接樹脂にネジ山加工を行うと数回のつけ外し

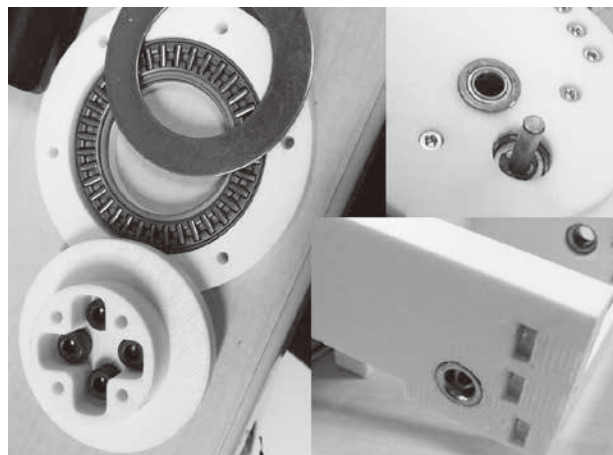


図-8 ベアリングとオイルレスメタル軸受け。左：スラスト 右上：ラジアル 右下：オイルレスメタル

で崩壊してしまうため注意が必要である。ここで、図-7のようにねじを受ける部分に切り欠きを作り金属ナットを埋め込むことで、耐久性が格段に向上する。

軸受け埋込手法

これは3Dプリンタによる造形物に限らないが、他パーツとの荷重がかかる回転接触点にはベアリングを組み込むことで、出力物を摩耗せずに長く使用できるモノができる。水平荷重のかかる場所にはスラストベアリング、垂直方向の荷重や回転軸の支持にはラジアルベアリングを組み込む(図-8)。なお、図-8右下のようにパーツ端から軸までの距離が短い場合には、ボールベアリングを用いると大穴をあける必要があり、3Dプリント部品の強度が低下してしまう。このような個所にはオイルレスメタル軸受けを用いることで穴径を削減することができる。

◎外装仕上げテクニック

製作物の利用時の違和感をできるだけ減らすための、外装部分の仕上げテクニックを紹介する。

プラ板を用いた平面製作

熔融樹脂積層方式3Dプリンタでの出力物の表面には、特徴的な積層パターン(以下、段差)が発生するため、後述する研磨加工が大変になる。そこで、製作物に大きな平面がある場合は、平面部をアクリル/ABS/スチレン等のプラスチックシートを利用してレーザ加工などで作成し、残りの連結部等を



図-9 プラ板を用いた平面製作の一例。
平面に透明アクリル板をはめ込み、次の研磨加工を省略する

3D プリンタの出力部品と接着する (図-9)。

研磨とパテ塗り

次に、3D プリンタの出力物の段差を目立たなくするために、研磨とパテ塗りを行う。研磨作業は、耐水性の紙やすりを用いて、必ず水をかけながら進める。初めに180番の紙やすりを用い段差とは直角方向に研磨を行い、大方段差がなくなったところでよく乾燥させる。なお、各乾燥工程では埃の付着を防ぐために箱に入れ、半日程度放置する。ここで急ぐと、割れたり剥がれたりしやすいため注意が必要である。

次に、パテ（ポリエステルパテか光硬化パテ）を目立った段差に塗り込み、段差の解消を行う。乾燥後表面をよく観察し消えてない段差やプラスチックシートとの境界線部分にさらにパテを塗り込む。このときは、密着性のゴム手袋などをした上で、パテを指先で丁寧に分厚くならないように塗る。最後に、パテ硬化後に400番前後の紙やすりで研磨を行う。

下塗りと上塗り

次に、サーフェーサーと呼ばれる下塗り塗料を塗装し乾燥させる。下塗りをすると消し切れていない段差やヤスリ傷が可視化されるため、再度パテ塗り・研磨を行う。段差やヤスリ傷が解消されるまで下塗りと研磨を繰り返す。

次に、800番前後の紙やすりで研磨し、白色塗料をスプレー等で塗装する。塗料の色によっては下地の色が透けてしまう場合も多いため、綺麗に仕上げ

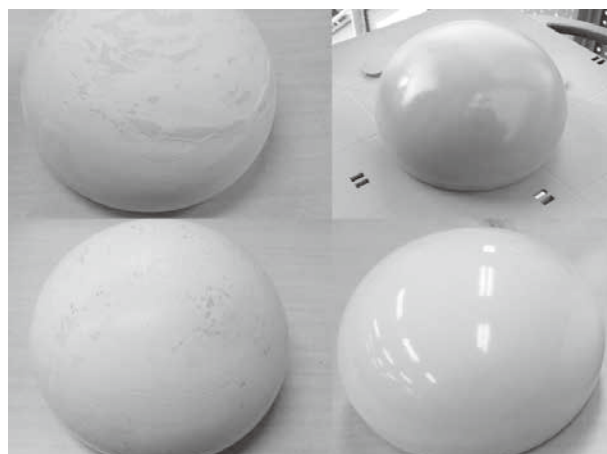


図-10 外装仕上げの一例。
左上：パテ塗り，左下：研磨，右上：下塗り，右下：上塗り

るためには事前の白色塗装が重要である。なお、銀色等メタリックを塗装する場合等は、下地を黒色で塗装したほうが綺麗な場合もある。塗装中、塗料の垂れや埃の付着が発生した場合でもふき取ったりせずそのまま乾燥させ、乾燥後に紙やすりで整える。

最後に、希望の色の塗料をスプレー等で塗装する。塗料が垂れないよう薄めに塗装・乾燥を繰り返し全体を均一に整える。人が触らない場所であればこれで完成だが、人が直接触れる場所ではさらにクリア塗装を行い、安定・剥げ防止を行う。

製作事例：AirSketcher

ここでは、前述した段階別プロトタイピングの具体例として、「AirSketcher」というシステムを紹介し、「体験検証プロトタイプ」と「ファイナルプロトタイプ」を中心に説明する。AirSketcherは扇風機の首振りパターンや風量を、2次元マーカを用いてユーザがインタラクティブに調整できるシステムである³⁾(図-11)。

◎体験検証プロトタイプ

AirSketcherに必要な要素は、通常の扇風機に対して、2次元マーカを認識する画像処理システムと縦横2軸の首振り機構を付加することである。

動作検証プロトタイプまでは小型扇風機を用いたミニチュアモデルとして実装したが、最終的にはリ



図-11 AirSketcherの動作検証プロトタイプ



図-12 AirSketcherの体験検証プロトタイプの機構と外装

ビングで利用するシステムであるため、体験検証段階からは家庭用の一般扇風機サイズとした。

設計時間を短縮するため、羽回り部品は市販の扇風機をそのまま用いた上で、首振り機構を自作する方針とした。さらに、一般的な扇風機のように部屋の中で移動可能とするために、制御回路だけでなく画像処理コンピュータも台座に内蔵することとした。機構としては、2軸の首振り制御を実現するためのヒンジ部分を3Dプリンタで作成した。また、扇風機の可動部分は重量があるため、特に高トルクなラジコンヨット用のサーボモータを用いることで首振り動作の安定化を図った(図-12)。

◎ファイナルプロトタイプ

日本科学未来館での半年間にわたる展示「もんとすむいえ」を始め、各所での体験展示を行うために、ファイナルプロトタイプを設計・実装した。ここでは、「耐久性」「外観」の観点から変更点を説明する。

耐久性向上のための設計変更

まず、長期間の展示に耐えられるよう、体験検証プロトタイプの不安定要素を洗い出し、以下のよう

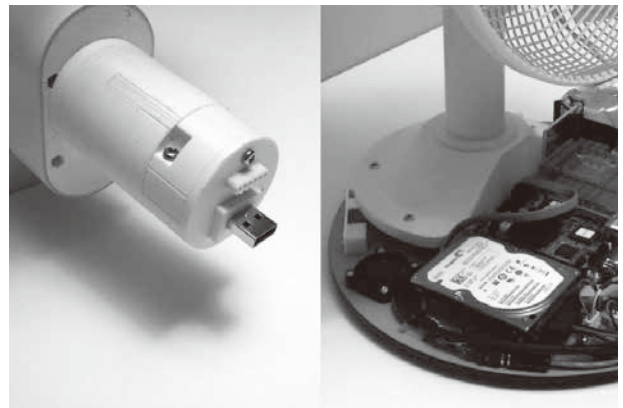


図-13 ファイナルプロトタイプの機構改善、ボールの着脱構造と取付け部

に対策を行った。

- ・可視光線カメラを用いているため室内であっても照明条件に左右されていたため、赤外線カメラを用いるとともに扇風機中央の蓋部分に赤外線投光器を組み込むことで安定した画像処理を行うこととした。
- ・台座から羽部分までの高さが高いせいで首が動くたびに振動し、見た目の挙動が不安定でボールの強度も不安であった。よって、ポール固定部分の設計を見直し強度を向上させるとともにポールを短くして脱着可能な構造とすることで、高さの可変とメンテナンス性の向上を行った(図-13)。
- ・コンピュータの発熱の問題があったため、土台部分に吸気・排気それぞれのファンを取り付け強制的に排熱する仕様とした。この際、ファンによる騒音が発生するが安定動作のため割り切る方針とした。
- ・3Dプリンタ出力物に直接タップ加工を行っていたため、強度に不安があった。そこで、前章で紹介したように、金属ナットを組み込むことで強度とメンテナンス性の向上を図った。

外観のための設計変更

AirSketcherで注目してほしい点は操作手法と動きであるため、扇風機そのものは目立つことない自然な形状を目指して、以下のように設計を改良した。

- ・首部分にカウンターウェイトを設置して首上げ動作に必要な力を低減させ、サーボを小型高ト



図-14 日本科学未来館内のリビングラボに設置したファイナルプロトタイプ

ルク品に変更することで、首振り機構を小型化した。これにより、市販品の部品を流用する羽やカバーとのサイズバランスに違和感のないよう配慮した。

- 3DプリンタによるABS樹脂等の独自部品と市販部品等との連結に違和感がないように前章で紹介したように研磨・塗装を行った。全体を塗装し質感を揃えることで、「部品を組み合わせた試作品」から「一体感のある製品」に見えるようになる。

「製品レベル」のプロトタイプへ

本稿では、筆者の取り組んできたインタラクション研究のための段階別モノづくり手法やその実例を

紹介し、特に試作品を製品に近づけるための「仕上げ」技術を説明した。本稿冒頭で述べたように、研究目的のプロトタイプでは、大量生産などの工業的な制約を最初から考慮することは難しい。しかし、本稿で紹介したようなテクニックを駆使することで、展示会などでユーザに「製品レベルの体験」を提供することは十分可能だと考えている。本稿が多くの読者のモノづくりの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) Sugiura, Y., Toda, K., Hoshi, T., Inami, M. and Igarashi, T. : Graffiti Fur : Turning Your Carpet Into a Computer Display. In Proceedings of UIST '14 (2014).
- 2) 東京国立博物館 インタラクティブ映像展示, 不思議なライトで伊能図を見てみよう (2014).
- 3) 渡邊恵太, 神山洋一, 門城 拓, 松田聖大, 稲見昌彦, 五十嵐健夫 : AirSketcher : 扇風機の直接的な風の教示手法, コンピュータソフトウェア, Vol.29, No.4, pp.287-298, 岩波書店 (2012).

(2014年7月28日受付)

神山洋一 ■ kamiyama@kmd.keio.ac.jp

2001年都立高専卒業。2007年山梨大学大学院電気電子システム専攻修了。JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト技術員等を経て、現在慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科研究員。『学生の作ったモノはすぐ壊れる』状況を打破すべく活動中。