

触感を伴って空中映像に触れるインタラクションシステム

和田 恭坪^{1,a)} 木島 卓也¹ 小水内 俊介¹ 近野 敦¹

概要: 従来の仮想現実 (VR) 技術はユーザが仮想世界に入り込むスタイルでいかに高い没入感を実現するかを追求するものだった。本論文では、仮想物体を現実世界に投影してユーザが直に触れるスタイルを実現する。空中立体映像への直接的な接触と力触覚提示を統合することで、これまでに無いインタラクティブな情報インタフェースを提供する。

Interaction system touching the aerial image along with the tactile sensation

WADA KYOHEI^{1,a)} KIZIMA TAKUYA¹ KOMIZUNAI SHUNSUKE¹ KONNO ATSUSHI¹

Abstract: The conventional virtual reality (VR) technology pursued it whether a user realized a feeling of high immersion. In this article, We realize the style that users can touch a virtual object directly in the reality world. We provide a new interactive information interface which is union of an aerial three-dimensional image and the tactile sensation .

1. はじめに

近年、ヒューマンコンピュータインタフェースとして空中映像や立体映像と力触覚との融合に関する研究が注目を集めている。空中映像や立体映像といった視覚情報と力触覚といった触覚情報を融合する方法として、非接触な方法 [1][2] とデバイスを装着する方法 [3][4][5] がある。

非接触な方法はデバイスを装着する方法に比べ、デバイスを装着する手間が無いこととデバイスによる手の輪郭を崩されないことによる直感的な操作が容易という利点がある。しかし、非接触な方法では装置全体が大型で複雑な構造になることと力触覚の提示が曖昧になるという問題点がある。

空中映像に直接触れる事が可能なシステムには、霧を利用した Helio Display [6] や Fog Screen [7], DisplAir [8], Leia Display System [9], AerScreen [10] など商用の大型装置が知られている。従来のモニタを置き換えることを想定すると、デスクトップサイズのシステムが望ましい。

本論文では、触感を伴って空中映像に直接触れるインタラクションシステムを提案する。これまで独自に開発してきた空中映像表示装置と装着型力覚提示装置に、非接触動作計測技術と 3DCG 描画技術を組み合わせ、空間的・視覚的に整合性のある視覚・力覚統合インタラクションシステムを開発する。

2. グローブ型力覚提示装置

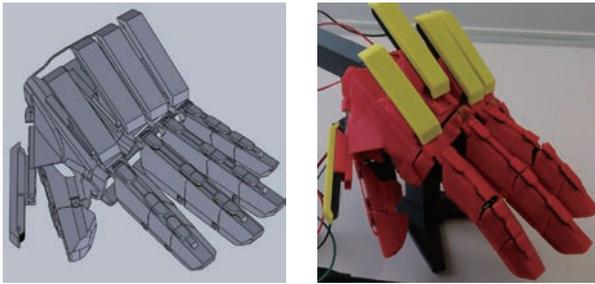
図 1 に開発したグローブ型力覚提示装置の概観を示す。本装置の特徴は手の輪郭を崩さないコンパクトな実装であり、これは視覚提示との併用において視覚情報を損ねないための重要な要素である。

本装置は計測機能を担うセンサグローブと指の動きを制約する駆動機構からなる。センサグローブにより手の位置姿勢や指の曲げ具合を計測し、駆動機構によってユーザの指に伸展を強制させることで力覚を提示する。

2.1 センサグローブ部

センサグローブは、手の位置姿勢の計測機器であると同時にグローブの外殻を構成する。図 2 にセンサグローブにおける中指の可動範囲を示す。図 2(a) は指の最大屈曲角度

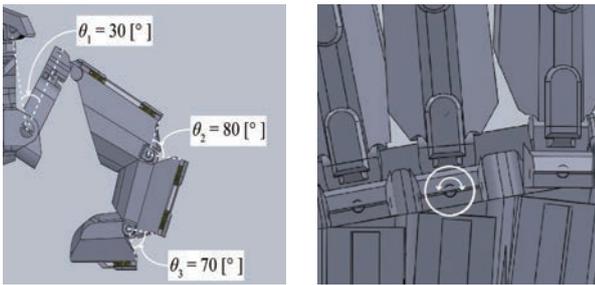
¹ 北海道大学
Hokkaido University
a) wada@scc.ist.hokudai.ac.jp



(a) CAD モデル (b) 実機
(a) CAD model (b) Actual machine

図 1 グローブ型力覚提示装置の概観

Fig. 1 An overview of the glove type haptic device



(a) 屈曲 (b) 外転
(a) Flexion (b) Eversion

図 2 指の可動性

Fig. 2 Mobility of the finger

表 1 BMF100 の仕様 [11]

Table 1 Specification of the BMF100[11]

標準直径 [mm]	0.1
実用発生力 [gf]	70
実用運動ひずみ [%]	4.0
標準駆動電流 [mA]	200
標準駆動電圧 [V/m]	27
抵抗値 [Ω /m]	135
引張り強度 [kgf]	0.8
重量 [mg/m]	50

であり、この状態を完全屈曲状態と呼ぶ。また、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ がすべて $0[^\circ]$ のときを完全伸展状態と呼ぶ。図 2(b) は手甲部の指の付け根を示しており、他の指が手甲に衝突するまで外転することができる。

各指上部にはスリットがあり、可変抵抗素子である曲げセンサ (sparkfun 製, Flex Sensor) が挿入されている。これによって指の屈曲度を計測する。

2.2 駆動機構部

手の輪郭を崩さないためには、駆動機構がコンパクトであることが重要である。本機構では、小型かつ軽量のアクチュエータとして SMA ベースのワイヤであるバイオメタル (トキ・コーポレーション株式会社製 BMF100) を用いる。以下このワイヤを SMA ワイヤと呼ぶ。SMA ワイ

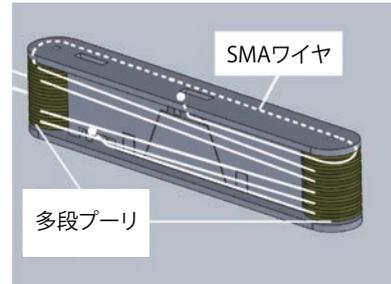
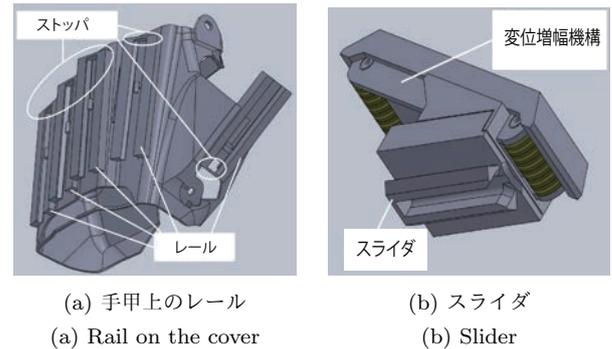


図 3 多段プーリによる SMA ワイヤの変位増幅機構 [12]

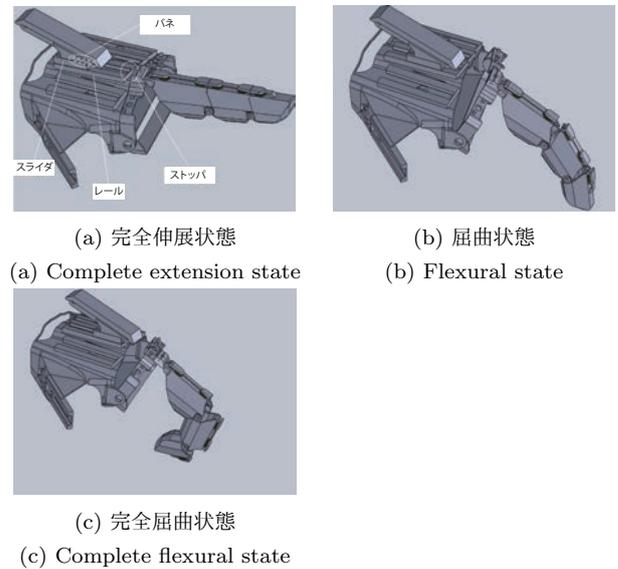
Fig. 3 Displacement amplification mechanism of the SMA wire by the multistage pulley[12]



(a) 手甲上のレール (b) スライダ
(a) Rail on the cover (b) Slider

図 4 SMA ワイヤの張力保持機構

Fig. 4 Tension maintenance mechanism of the SMA wire



(a) 完全伸展状態 (b) 屈曲状態
(a) Complete extension state (b) Flexural state

(c) 完全屈曲状態 (c) Complete flexural state

図 5 指と駆動機構の連動

Fig. 5 Interlocking movement of a finger and the transport

は表 1 に示すような性質を持ち、電圧を印加することによって収縮するという特性を持つ。

本装置はこの特性を用いることで指の屈曲角度を制限する。これによって使用者にあたかも力覚を得ているように錯覚させる。しかし、この特性におけるワイヤの収縮率は $4[\%]$ と小さい。この特性を用いて力覚を提示するためには、十分な変位量を得る必要がある。そのために図 3 に示す多段プーリによる変位増幅機構を用いた。これによ

てコンパクトな機構による十分な変位量を確保している。
[12]

変位増幅機構を手甲上に配置することによって指上の駆動機構を排除し、視覚情報への妨げとなる事を防ぐ。

SMA ワイヤは指の完全屈曲状態に合わせて長さを決定する。そのため、完全屈曲状態以外において SMA ワイヤは緩んでしまう。緩んだ状態では駆動しても力覚を提示することができない。これを解決するために、図 4 に示す機構を用いた。この機構は手甲部分に搭載されたレールとストッパ、変位増幅機構に取り付けたスライダ、ストッパとスライダの間に入れるバネによって構成されている。

指が完全屈曲状態から完全伸展状態へ移動する間においては、バネの力を使って変位増幅器の位置を手首方向に移動させる。これによって SMA ワイヤのテンションを調整する。さらに、指が完全伸展状態から完全屈曲状態へ移動する間においては、指とバネの力の向きが逆方向になるのを利用してワイヤのテンションを調整する。このため、使用するバネは指がワイヤに加える力よりも小さい力の物を使用する。

図 5 に完全伸展状態、屈曲状態、完全屈曲状態における変位増幅機構の位置を示す。

2.3 印加電圧と屈曲度の関係

・駆動と計測の関係

本装置の駆動制御の目的は、空中映像との接触判定があった場合に指の現在の屈曲状態を保持することである。これは、指がさらに屈曲しないように拘束することを意味しており、伸展は許容する。ある屈曲状態を拘束するためには、現在の屈曲度に対応した SMA ワイヤの収縮量を知ることが必要となる。実際にはそれに加え、SMA ワイヤの収縮量を実現するための制御入力 (PWM 信号) を知る必要がある。そこで、逆問題として SMA ワイヤを自然長から徐々に収縮させていった時の屈曲度を計測することで、PWM 信号と屈曲度の静的な関係を同定する。屈曲度は、曲げセンサの抵抗値から求められるため、まずは PWM 信号と抵抗値の関係を計測する。図 6 に実験の概観、図 7 に PWM 信号と抵抗値の関係を示す。図 7 における近似式は準ニュートン法による最適化によって求めた。準ニュートン法の計算アルゴリズムは次のようになる。

$$(1) \text{ 目的関数: } f(\mathbf{x}) = -a_1 \cdot \tanh(a_2 \cdot \mathbf{x} - a_3) + a_4$$

$$\mathbf{x} = (0, 1, 2, \dots, 255)^T \text{ とする}$$

$$(2) \text{ 初期点 } \mathbf{x}(0) \text{ を任意で与え, } k = 0, \mathbf{H}(0) = \mathbf{I} \text{ とする}$$

$$(3) \mathbf{g}(k) = \nabla f(\mathbf{x}(k)) \text{ を計算し, } \mathbf{g}(k) < \varepsilon \text{ ならば計算を終了する}$$

なお、 ε は十分に小さい数とする

$$(4) \mathbf{p}(k) = -\mathbf{H}(k)\mathbf{g}(k), \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \alpha(k)\mathbf{p}(k) \text{ とする}$$

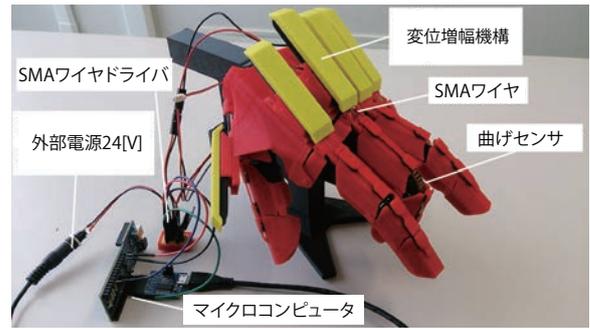


図 6 SMA ワイヤと曲げセンサの関係同定実験の概観
Fig. 6 Overview of the relationship identification experiment of SMA wires and bending sensor

なお、 $\alpha(k)$ は一次元探索で決める

$$(5) \mathbf{s}(k) \equiv \mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k) \equiv \mathbf{g}(k+1) - \mathbf{g}(k) \text{ とし}$$

$$\mathbf{H}(k+1) = \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{s}(k)\mathbf{y}(k)^T}{\mathbf{s}(k)^T\mathbf{y}(k)} \right] \mathbf{H}(k) \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{y}(k)\mathbf{s}(k)^T}{\mathbf{s}(k)^T\mathbf{y}(k)} \right]$$

$$+ \frac{\mathbf{s}(k)\mathbf{s}(k)^T}{\mathbf{s}(k)^T\mathbf{y}(k)} \text{ を計算する}$$

$$(6) k = k+1 \text{ として (3) に戻る}$$

求めた近似式と実測値との誤差を図 8 に示す。求めた近似式と実測値において誤差率は大きくとも 2.5 [%] 以内になることが確認できる。これより、求めた近似式は精度的に問題が無いと考える。

・駆動

外部電源 24 [V] に接続された SMA ワイヤに対して、PWM 制御によって任意の電圧を印加する。SMA ワイヤは長さに応じた抵抗値 (表 1) を持ち、印加電圧に応じた電流が流れる。電流が流れると SMA ワイヤはジュール熱によって収縮する。したがって、SMA ワイヤの収縮は PWM 信号によって制御可能である。一方、SMA ワイヤの弛緩は自然冷却によるため比較的緩慢な挙動となる。

・計測

指の屈曲度は、直接的には曲げセンサの抵抗値の変化として計測される。しかし、センサ自体の個体差や指ごとの可動性の違いなどから、全てのセンサの計測値を画一的に取り扱うことはできない。そこで、各センサごとに計測値の最大値/最小値を記録し、計測値を無次元化する事を考える。本装置の使用開始時に手を数回大きく開閉する動作 (キャリブレーション) を行うことで、暫定的に抵抗値の最大値/最小値を取得する。この操作により、全てのセンサの計測値を 0-1 の間で変化するため、画一的に取り扱うことが可能となる。

2.4 駆動制御手法

本装置は曲げセンサの抵抗値を読み取る事によって出力する PWM の数値を決定している。次式に準ニュートン法によって求めた近似式を実際に使用する式への式変形を示

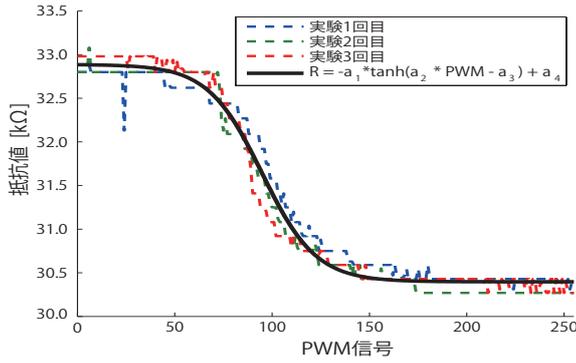


図 7 PWM 信号と抵抗の関係

Fig. 7 Relations of PWM signal and the resistance

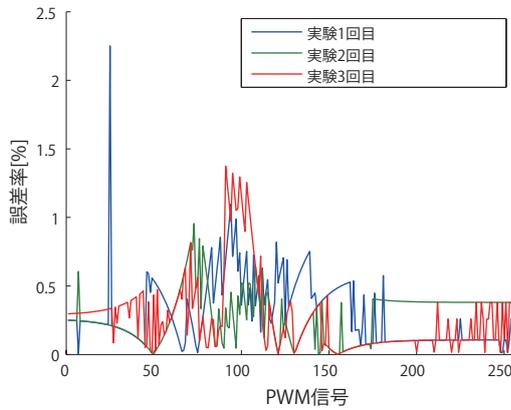


図 8 近似曲線に対する実測値の誤差

Fig. 8 Error of the actual value for the approximate curve

す。なお、 R_{bend} は曲げセンサの抵抗値、 P_{bend} は PWM による出力値、 a_1, a_2, a_3, a_4 は準ニュートン法で求めた係数とする。

$$R_{\text{bend}} = -a_1 \tanh(a_2 \cdot P_{\text{bend}} - a_3) + a_4 \quad (1)$$

$$P_{\text{bend}} = \frac{1}{a_2} \left\{ \tanh^{-1} \left(\frac{a_4 - R_{\text{bend}}}{a_1} \right) + a_3 \right\} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2a_2} \log \left| \frac{1 + \frac{a_4 - R_{\text{bend}}}{a_1}}{1 - \frac{a_4 - R_{\text{bend}}}{a_1}} \right| + \frac{a_3}{a_2} \quad (3)$$

曲げセンサの素子における個体差を次式によって補正する。次式において曲げセンサと SMA ワイヤの関係同定実験時における完全屈曲時の抵抗値を R_{max} 、完全伸展時の抵抗値を R_{min} 、駆動時の抵抗値を r 、駆動時の完全屈曲時の抵抗値を r_{max} 、完全伸展時の抵抗値を r_{min} とする。

$$R_{\text{bend}} = R_{\text{min}} + \left\{ (R_{\text{max}} - R_{\text{min}}) \cdot \frac{r - r_{\text{min}}}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}}} \right\} \quad (4)$$

式 (3) と式 (4) を用いてグローブ型力覚提示装置の駆動を制御する。

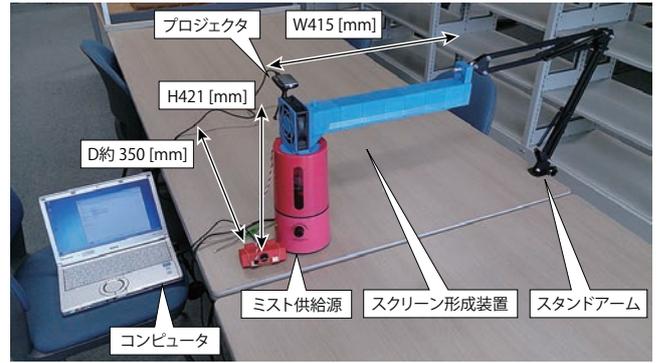


図 9 空中映像表示システムの概観

Fig. 9 General view of the space image indication system

3. ミストスクリーンによる空中映像表示システム

3.1 概要

図 9 に空中映像表示システムの概観を示す。システム全体の規模は幅 415[mm]、奥行約 350[mm]、高さ 421[mm] であり、デスクトップサイズとして現実的な規模と言える。本システムは、スクリーン形成装置、ミスト供給源、プロジェクタ、映像再生用コンピュータ、スタンドアームで構成されている。スクリーン形成装置は複数の特徴を持つため次章で詳細に説明する。

ミスト供給源には超音波式加湿器 (阪和社製, Mr. ミスト ver.4, BBH-54A) を使用する。BBH-54A のミスト供給力 (加湿力) は 300[ml/h] 程度であり、同サイズの加湿器と比べても良好な性能である。これは本システムにおいて必要十分な性能である。また、BBH-54A のミスト噴出口にスクリーン形成装置を直接取り付け可能とすることで、BBH-54A が本システム全体の支柱を兼ねるように構成されている。

映像の投影にはモバイルプロジェクタ (RoyalTek 社製, PJU-2100) を用いる。表 2 に PJU-2100 の仕様を示す。本システムはデスクトップでの利用を想定しているため 10–20[inch] 程度の画面サイズが得られれば良い。PJU-2100 の投影サイズ (5–50[inch]) はこの要求に適合しており、最短投影距離が 200[mm] である点もデスクトップでの利用に都合がよい。映像投影時はスクリーン形成装置と同程度の高さからスクリーンを見下ろすようにプロジェクタを設置する。

本システムは単体で自立可能であるが、位置決めや安全性の観点から補助的にスタンドアームを使用している。

3.2 スクリーン形成装置

図 10 にスクリーン形成装置の概観を示す。図 10 中では、本装置は図 9 とは逆にノズルが上を向くように設置されている。本装置の構造は大きくノズルユニット、ミスト供給部、送風部の三つに分けられ、このほかに送風ファ

表 2 プロジェクタ PJU-2100 の仕様
Table 2 Specifications of projector PJU-2100

投影サイズ [inch]	5-50
投影距離 [mm]	200-2000
輝度 [lm]	20
解像度 [pixel]	640×360
コントラスト	1200:1
寸法 [mm]	W80×D60×H18
重量 [g]	64

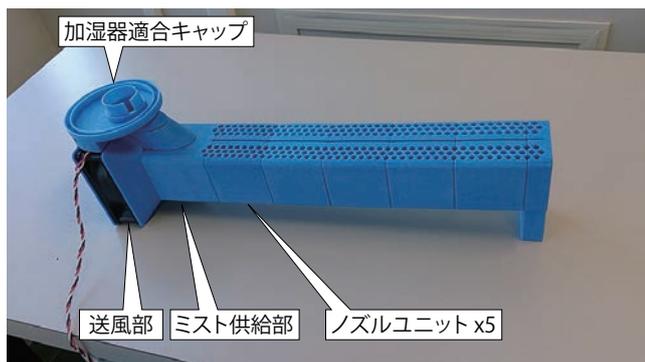


図 10 スクリーン形成装置
Fig. 10 Screen formation device

ン制御用のドライバが接続される。スクリーン形成の原理は、スリット状のノズルからミストを噴出させることでミストスクリーンを形成し、それを挟むようにエアを噴出させることでスクリーンを安定させる典型的な方法である。ただし、装置を小型化するためにミストやエアの供給方法が典型的な方法とは異なり、安定にスクリーンを形成するための工夫が必要となる。

3.3 ノズルユニット

図 11 にノズルユニットの CAD モデルおよび実機の概観を示す。ノズルユニット同士は連結可能であり、形成するスクリーンのサイズを自由に変更できる。

ノズルユニットの断面中央にあるパイプはミストの経路であり、パイプ側面がスリット状のノズルになる。したがって、ミストの経路の断面形状は涙滴型となる。このパイプを囲む正方形の空間はエアの経路であり、経路側面に配置されたハニカム状のノズルからエアが噴出する。エア用ノズルはミスト用ノズルを挟むように両脇に分布しており、エアカーテンによってミストスクリーンを安定化する [13]。

ノズルユニット内のミストフローは供給方向と噴出方向が異なっており直角に曲がる必要がある。しかし、供給方向の流速が優勢のため、装置上流では噴出されるミストが少なくスクリーンが薄くなるとともに、全体的なスクリーン密度が不均一になる。この問題を解決するためには、ミ

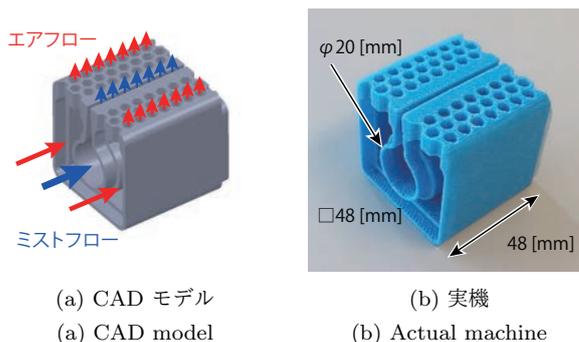


図 11 ノズルユニット
Fig. 11 Nozzle unit

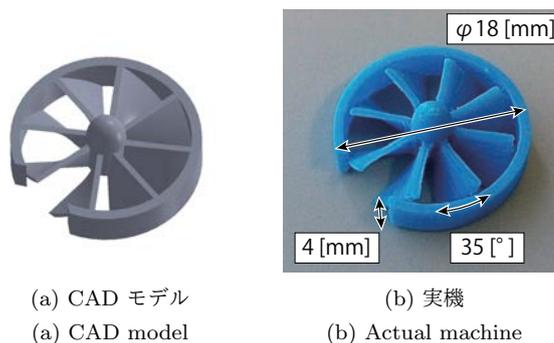


図 12 スワラ (旋回流発生装置)
Fig. 12 Swirler (turning style generator)

ストフローの供給方向流速を抑え、ノズルユニット内にある程度ミストを滞留させることが望ましい。そこで、各ノズルユニットのミスト流入口にスワラ (旋回流発生装置) を設置した。図 12 にスワラの CAD モデルおよび実機の概観を示す。このスワラを通過することによりミストフローは $35^\circ / 4\text{[mm]}$ の旋回流となる。厳密には、スワラの翼 (8 枚) は流路断面を全て覆ってはいないため直進流も一部通過する。ミストフローの主要成分を供給方向から周方向に変更することでミストフローを減速し、ノズルユニット内に滞留するミストの増加が期待される。

スワラを経たミストフローは依然として供給方向流速を持っており、スクリーン密度も依然不均一となる。そこで、ノズルに整流スリットを設けることでミストフローの供給方向成分を完全に打ち消す。図 13 に整流スリットの CAD モデルと実機の概観を示す。スリットは幅 5[mm] 、厚さ 1[mm] 、間隔 1[mm] の破線状に並んでいる。この整流スリットをノズルに取り付けることでミストが鉛直方向に揃って噴出され、スクリーンの質を向上させる。

図 14 にスワラと整流スリットを装着した状態のノズルユニットの概観を示す。使用する全てのノズルユニットに対して同様の装備を用いる。

3.4 ミスト供給部

図 15 にミスト供給部の CAD モデルと実機の概観を示

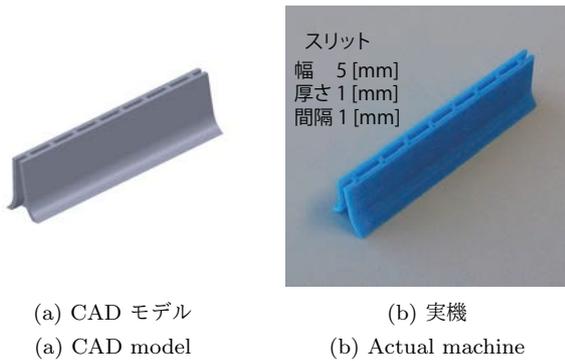


図 13 整流スリット
Fig. 13 Rectification slit

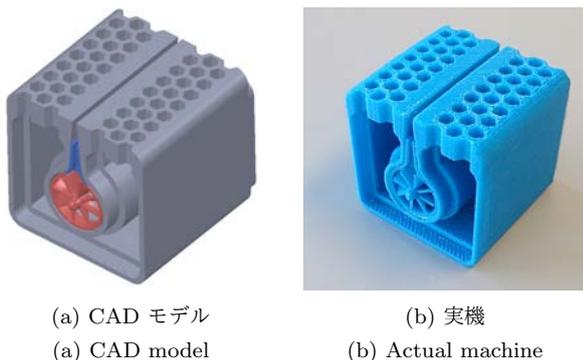


図 14 スワラと整流スリットを装着したノズルユニット
Fig. 14 The nozzle unit which attached a swirler and a rectification slit

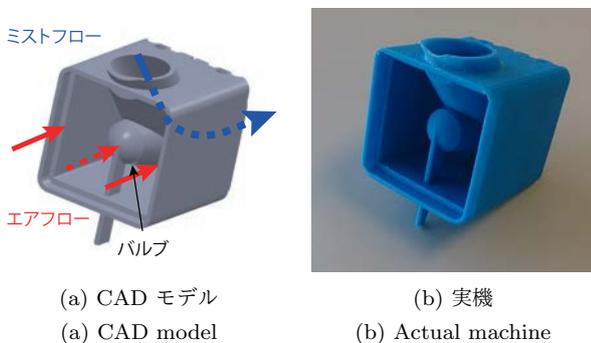


図 15 ミスト供給部
Fig. 15 Mist supply

す。ミスト供給部は、ミスト供給源から放出されたミストを水平方向に整流しノズルユニットに供給する。ノズルユニットと同様、ミストの経路の外周はエアの経路である。ミストの経路の屈曲部にはバルブが設けられており、エアフローの一部をミストの経路に取り込むことが可能である。エアフローの流入によりミストを加圧・加速することができ、ある程度ノズルユニットを延長した場合にも減衰することなく末端までミストを供給することが可能である。

3.5 送風部

送風部では、送風ファンで発生したエアフローを縮減してノズルユニットに供給する。このエアフローは、ミスト

表 3 送風ファンの仕様 [14], [15]

Table 3 Specifications of the ventilation fan [14], [15]

名称	RDD8025B	UCTB8
静圧 [mmAq]	8.38	1.47
最大風量 [CFM]	57.78	27.94
回転数 [rpm]	4,000	1,600
駆動 [V]/[A]	12/0.4	12/0.15
騒音 [dB]	40	15
寸法 [mm]	80 × 80 × 25	80 × 80 × 25

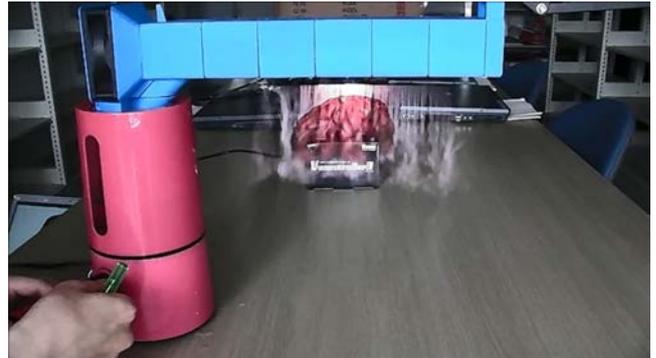


図 16 空中映像投影実験の様子
Fig. 16 State of the space image projection experiment

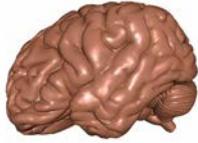
供給部およびノズルユニットを通してハニカム状のノズルから噴出してエアカーテンの役割を担う。装置内部のエアフローと噴出後のエアカーテンとで流れの向きが直角に変化することから、エアカーテンの出力に寄与する要素として、エアフローには流速より静圧が必要となる。したがって、静圧の高いファンを用いる。表 3 に本装置で使用するファン (X-FAN 社製, RDD8025B (40NMB)) と標準的な PC 用静穏ファン (ENERMAX 社製, T.B.Silence UCTB8) の仕様比較を示す。RDD8025B の方が全体的に強力ではあるが、静圧性能が突出して高いことがわかる。

送風ファンを制御するため、可変ボリュームを含む定電圧電源を利用したドライバを作成した。これにより、ファンの回転数を停止から全力回転まで手動で操作することが可能である。

3.6 空中映像の投影実験

図 16 に開発した空中映像表示システムを用いた投影実験の様子を示す。本実験では室内の照明は消灯し、窓から入る日光は遮蔽していない。また、室内の温度、湿度、空気の流れなどは特に管理せず、通常的生活環境において実験を実施した。投影した映像は脳の三次元モデルが回転するものである。スクリーン上のミストフローを確認するため、映像の背景を白としてミストを可視化した。

図 17 に投影した映像およびスクリーン上で観察された映像を示す。本実験で用いたプロジェクタにはリアプロジェクションのための映像反転機能がないため、図 17(a)



(a) 投影映像 (反転表示)
(a) Projection image
(reversing display)



(b) スクリーン上の映像
(b) Image on the screen

図 17 ミストスクリーンに投影された映像

Fig. 17 The image which was reflected by mist screen

に示した画像は実際に投影された映像を反転表示したものである。スクリーン上で観察された映像は幅約 200[mm] (9-10[inch] 相当) で、日光下でも脳のしわが判別できる程度に鮮明である。また、プロジェクタ配置とユーザの視点とともにスクリーン形成装置と同じ高さとしてスクリーンを見下ろすことで、プロジェクタの光を直視することなく安全に観察可能である。このことから、本システムがデスクトップでの利用において現実的な性能を持つと考えることができる。

スクリーン形成装置内部ではスクリーンを横断するようにミストが流れているが、スクリーン自体は概ね均一に形成されており、ミストが鉛直下方に流れていることがわかる。このことから、スワラおよび整流スリットが効果的に機能していることがわかる。一方、整流スリットによってスクリーンが短冊状に断裂しており、スリットの出口形状には改善の余地が見られた。また、エアカーテンの併用にもかかわらず本システムの間程度でスクリーンが拡散しており、地面による気流の影響を考慮する必要があると考えられる。

4. 視覚・力触覚統合インタラクションシステム

図 18, 19 に示すように、空中映像表示装置と力覚提示装置に非接触動作計測技術と 3DCG 描画技術を組み合わせ、これらを統合的に運用できるシステムを構成することで、空間的・視覚的に整合性のある視覚・力覚統合インタラクションシステムを構築する。これが、本論文で提案する触感を伴って空中映像に直接接触するインタラクションシステムである。非接触動作計測には Leap Motion を用い、3DCG の描画、空中映像の投影、力覚提示のための駆動指令などの処理は一台の PC で統括する。3DCG の描画環境には Unity を用いる。Unity の持つ様々な機能の内、本システムにおいて重要となりうる特徴的な機能を以下に挙げる。

- 3DCG 描画が容易
- 動力学演算 (接触判定や反力計算など) が可能
- 外部機器 (マイコン) とのシリアル通信による連携が

可能

- 外部センサ (本論文では Leap Motion) の利用が容易
- 各種機能を利用するためのユーザスクリプトの開発が容易

これらの観点から、本システムを統括する PC における開発環境として Unity が適している。

図 20 に本システムのデータフローを示す。視覚提示装置について、PC からプロジェクタへ 3DCG の映像が出力され、プロジェクタからミストスクリーンへ映像が投影される。この時、ミストスクリーンは背面投影を基本とするため、PC から出力される映像は左右反転されている必要がある。図 21 (a) に PC 上の左右反転された映像、同図 (b) にユーザ視点の様子、同図 (c) に空中映像と装着型力覚提示装置が接触している様子、同図 (d) に空中映像と装着型力覚提示装置が非接触の様子を示す。空中投影された映像にユーザが触れようとするとき、手の動作を非接触動作計測装置によって計測する。計測された運動情報は Unity に取り込まれ 3DCG の描画に反映される。図 21 (a) 中には透明度の高い手の 3D モデルが描画されている。Unity の接触判定機能により手のモデルと他の物体との接触が検出されたとき、その接触情報を力覚提示装置に搭載されたマイコンへシリアル通信によって伝達する。マイコンが接触情報を受信したとき、指の現在の屈曲状態を拘束するのに必要な PWM 信号を出力し、適切な電圧を印加することで SMA ワイヤを収縮させる。なお、力覚提示装置自体には動作ログを保存する機能が無いため、計測値や駆動指令などの内部情報は全て PC へ送信してファイル出力する。

図 21 に示す実験では、空中投影された立方体ブロックに対して人差し指でアプローチし、接触時に指の屈曲が拘束されることと、接触を数回繰り返すことができることが確認された。空中映像の奥が透けて見えるため厳密な奥行きが目測がしにくく、接触動作のアプローチは緩慢になる。そのため、SMA ワイヤ収縮時のわずかな駆動遅れは、接触動作の緩慢さにより知覚しにくい程度となった。SMA ワイヤ弛緩時の緩慢さは、二回目以降の接触がより深い位置での接触にならない限り知覚できなかった。

本システムではミストスクリーンに対するユーザ視点や動作計測装置の位置関係が重要となる。現実空間と CG 空間とでこれらに不整合がある場合、ユーザの手と CG 中の手のモデルの位置姿勢がずれる原因となる。したがって、双方の手を見比べながらの位置調整が必要であった。また、ミストスクリーンゆえの視域の狭さが位置調整を困難とする要因となった。

この併用試験によって、使用者が空中映像に触れた時に SWA ワイヤによって使用者の指がそれ以上曲がらないように固定される事が確認された。以上より視覚情報提示と力覚提示をシステムの統合できたことになる。

今回の併用試験において、使用者の視点の位置を投影画

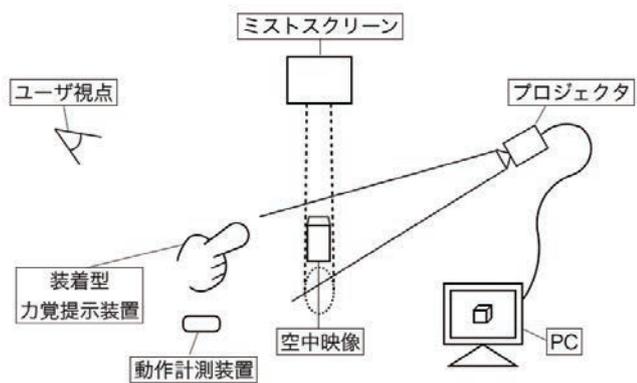


図 18 システム構成
Fig. 18 System configuration

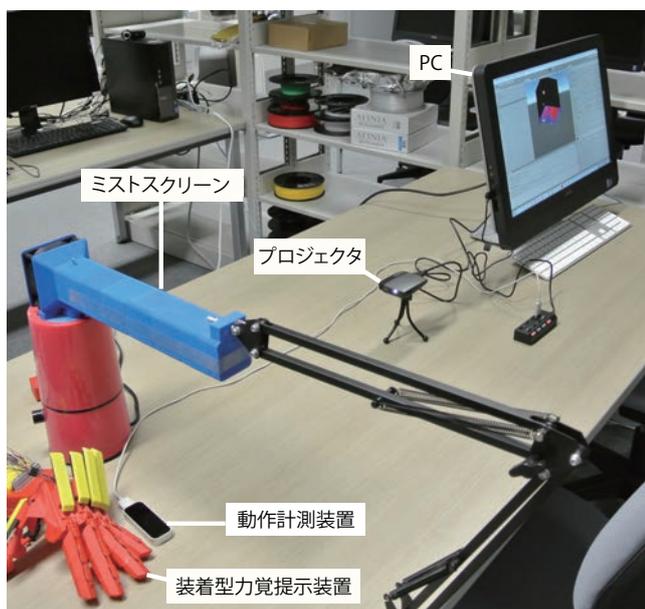


図 19 システムの概観
Fig. 19 General view of the system

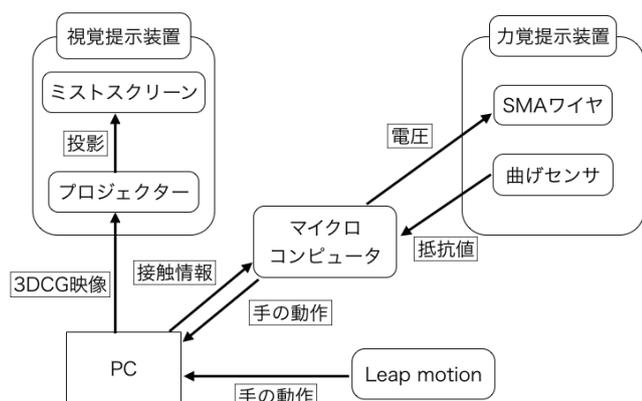
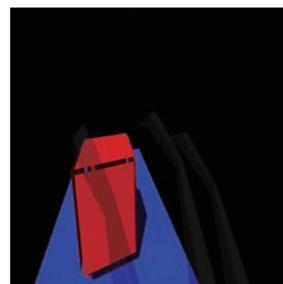


図 20 データフロー
Fig. 20 Dataflow

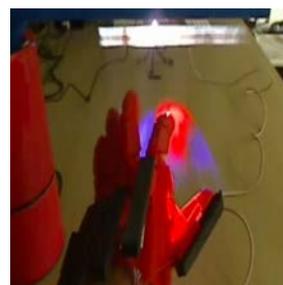
像の配置位置に反映する事が操作性の向上に大きく関係していることが分かった。



(a) 投影映像 (反転表示)
(a) Projection image (reversing display)



(b) ユーザ視点の様子
(b) State of the user viewpoint



(c) 空中映像と接触状態
(c) Aerial image and contact state



(d) 空中映像と非接触状態
(d) Aerial image and noncontact state

図 21 視覚・力覚統合インタラクション実験

図 21 Visual and tactile force integration interaction experiment

5. おわりに

本論文では、触感を伴って空中映像に直接触れるインタラクションシステムについて述べた。これまで独自に開発してきた空中映像表示装置と装着型力覚提示装置に、非接触動作計測技術と3DCG描画技術を組み合わせ、空間的・視覚的に整合性のある視覚・力覚統合インタラクションシステムを開発した。

ミストスクリーンへの3DCG投影により、空中に浮いて見える3DCGオブジェクトへの直接的な接触を可能とした。ユーザの手の非接触動作計測により、手が3DCGオブジェクトに触れたことを検出可能とした。力覚提示装置が指の動作を拘束することにより、オブジェクトに触れた感触をユーザへ提示することができた。

今後は、ユーザ視点に応じた映像の調整とミストスクリーンの狭い視域の克服に取り組む。実際のユーザ視点と映像生成時に想定しているユーザ視点と異なる場合、ユーザの手と空中映像の位置・姿勢にずれが生じ操作性を損ねる。そのため、ユーザ視点を追跡可能なセンサの導入と視点情報を反映できる映像生成手法を開発する。また、視点選択の自由度向上や複数人での利用などの観点から、多視点視可能なミストスクリーン技術を開発する。

参考文献

- [1] Ochiai, Y., Kumagai, K., Hoshi, T., Rekimoto, J., Hasegawa, S. and Hayasaki, Y.: Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, *arXiv preprint arXiv:1506.06668* (2015).
- [2] 星貴之, 岩本貴之, 正篠田裕之: 空中超音波振動子アレイによる触覚提示, *Proc. ROBOMECH2009, 1A1-A14 (1-4)* (2009).
- [3] CyberGloveSystems: CyberGlove, <http://www.cyberglovesystems.com/> (2014).
- [4] Bouzit, M., Burdea, G., Popescu, G. and Boian, R.: The Rutgers Master II-new design force-feedback glove, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 7, No. 2, pp. 256–263 (2002).
- [5] Nakagawara, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S. and Kawabuchi, I.: An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints, *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 2667–2672 (2005).
- [6] iO2 Technology: Helio Display, <http://www.io2technology.com/> (2014).
- [7] FogScreen: FogScreen, <http://www.fogscreen.com/> (2014).
- [8] Displair: Displair, <http://displair.com/> (2014).
- [9] LeiaDisplaySystem: Leia Display System, <http://www.leiadisplay.com/> (2014).
- [10] AerScreen: AerScreen, <http://aerscreen.net/> (2014).
- [11] トキ・コーポレーション株式会社: バイオメタル, <http://www.toki.co.jp/biometal/> (2014).
- [12] Hara, F. and Pfeifer, R.: *Morpho-functional machines: The new species: Designing embodied intelligence*, Springer Science & Business Media (2011).
- [13] 久米祐一郎, 鈴木和哉: 混相流を用いた自由空間投影法の検討, *映像情報メディア学会誌*, Vol. 56, No. 5, pp. 867–871 (2002).
- [14] X-FAN 日本正規代理店長尾製作所: 80mmFAN, <http://www.x-fan.jp/products/80.html> (2014).
- [15] 株式会社クーラージャイアント: ENERMAX T.B.Silence シリーズ, <http://www.enermaxjapan.com> (2014).