

身体行為を立体的に表現する“Interactive Spatial Copy Wall”の開発

○上杉繁（早稲田大学） 鈴木伸嘉（早稲田大学大学院） 渡辺貴文（早稲田大学大学院）
三輪敬之（早稲田大学）

Developing “Interactive Spatial Copy Wall” Expressing Bodily Actions in Three Dimensions

* S. Wesugi(Waseda University), N. Suzuki(Graduate School of Waseda University),
T. Watanabe(Graduate School of Waseda University) and Y. Miwa(Waseda University)

Abstract—A requirement of communication technology creating a sense of bodily presence of a remote person is anticipated to increase more than ever. However, this type of communication technology has underdeveloped so far. In order to create such a sense, we have proposed a novel concept “Interactive Spatial Copy Wall” display system, which represents a three-dimensional shape of a remote communication partner with movable cylinders. In this paper, we describe our further-advanced “Interactive Spatial Copy Wall” display system to represent bodily actions of remote person’s upper body in real time. For this advancement, we have designed a modified “Interactive Spatial Copy Wall” by focusing on power source, data communication and measuring three-dimensional appearance of a remote person. Consequently, this revised “Interactive Spatial Copy Wall” display system achieves to represent bodily actions of remote person’s upper body in three dimensions, corresponding to hundreds of movements of installed cylinders.

Key Words: Presence, Avatar, Bodily action, Embodiment, Three-dimensional measurement, Pin display

1 はじめに

離れた家族とのつながりの感覚や見まもりなどを支援する技術が提案され始め^{1,2)}、遠隔の相手の存在感や共に居合わせる感覚の創出支援は今後ますます期待されると考えられる³⁾。しかしながら、その技術や設計手法は発展途上であるといえよう。このような問題に対して著者らは、遠隔の相手の身体的な存在感を強め合うために、身体的インタラクションに着目した2通りの方法を提案してきた。1つめは、身体行為を忠実に表現するビデオ映像と、実体としての存在感があるロボットを組み合わせる方法である。そして、遠隔の相手の眼球運動、瞬き、頷きを表現し、その表面には相手の頭部の映像を投影するロボットアバターをこれまでに開発してきた⁴⁾。コミュニケーション実験の結果、ロボットの活用によって、相手の存在感を創出する可能性を見出してきた。同時に、リアルタイムで遠隔の相手の身体行為を再現すること、大きさや形状を一致させること、集団でコミュニケーションすることなどにおいて、人間型ロボットを利用する課題も明らかになった。2つめは、相手のビデオ映像と相手が操作する実体の動きを組み合わせる方法である。そして、互いが操作するディスクの回転を一致させ、かつそのディスクとのインタラクションを視覚的に共有する同期回転ディスクコミュニケーションシステムを開発してきた⁵⁾。これにより、単に相手の映像を表現する方法と比較して、相手の存在感が強まることを明らかにした。

本研究の目標は、遠隔の相手があたかも自身の場所に居合わせているかのような感覚を創出するディスプレイの設計手法の考案、およびシステムの開発である。そこで上記に述べた2つの方法の特徴を組み合わせた“Interactive Spatial Copy Wall”ディスプレイシステムをこれまでに提案した⁶⁾。先に開発したシステムでは、96本の移動するシリンダーを組み合わせて顔サイズのディスプレイを構築した。その結果、3次元的に相手の立体形状を表現し、シリンダーを互いに操作し合うことを実現した。本研究では、このアイデアをさらに発展させ、遠隔の相手の上半身の動きを3次元的に計測し、192本のシリンダーの動きによって再現するシステムの開発を行ったので報告する。

2 従来の“Interactive Spatial Copy Wall”

まずは、先に開発した“Interactive Spatial Copy Wall”⁶⁾についてまとめる。このディスプレイのアイデアは、Fig.1に示すピンディスプレイに由来している。ピンディスプレイは数百本のピンから構成されており、裏側から模型などのオブジェクトを押し当てると、3次元的に形状を再現することが可能である。このアイデアを次に示す2つの身体的インタラクションのモードを支援するディスプレイシステムへ適用することにした。

1. ディスプレイモード：シリンダーの移動により遠隔の相手の身体の立体形状を再現する
2. インタラクションモード：シリンダーを押したり引いたりすることで遠隔の相手とインタラクションする

実際のシステムを設計するに先立ち、スチレンフォーム製のモックアップを製作することで、上半身を再現するディスプレイのサイズや、シリンダーの形状・サイズ、本数、配列などを設計した。

そして、物理的な構造と情報処理のモジュール性に着目し、システムアーキテクチャを設計した。それぞれのシリンダーモジュールは、内部にシリンダー駆動機構、位置制御コントローラー、データ通信コントローラーを備えている。シリンダー駆動機構は、DCモーター、ロータリーエンコーダーから構成され、ホ

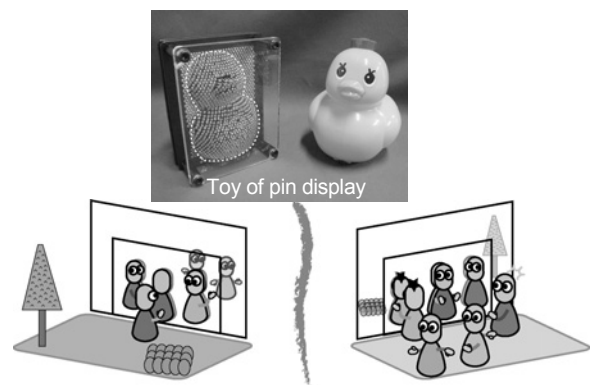


Fig.1: Conceptual image of “Interactive Spatial Copy Wall”

ストコンピュータからの目標値をもとに、ラック・ピニオン機構によってPID制御に基づきシリンダーの位置を制御する。ディスプレイシステムは、これらのモジュールを複数本組み合わせることで構成する。

さらに、遠隔の相手の身体の立体形状を取得するために、システムの前に上下、左右方向から2つの直交するカメラを設置し、これらの映像から三角法に基づいて立体形状を計算する。そして96個のモジュールからなるシステムを構築し、顔程度のサイズ内において、身体の一部の形状を立体的に再現し、また双方でシリンダーを操作可能なシステムを開発した。

3 上半身の動きを再現する“Interactive Spatial Copy Wall”

前章で述べたディスプレイモードに着目し、上半身の身体行為を再現するために、これまでのシステムの2倍のモジュールから構成し、さらには、赤外線カメラを利用したステレオ画像計測法に基づく3次元形状計測システムを組み合わせた“Interactive Spatial Copy Wall”を新たに開発したので以下に示す。

3.1 モジュールを組み合わせたディスプレイシステム

上半身の身体行為を再現するために、先に開発したシステムの2倍の192本のシリンダーモジュールからなるシステムを構築することにした。まずは、先に設計したアーキテクチャに基づき192本のモジュールを組み合わせたシステムを試作し、同時制御が可能であるか検討した。その結果、一部のシリンダー機構の動作やデータ通信が不安定であること、システム全体が突然停止してしまうなどの現象がしばしば観察された。このシステムの問題を解決するために、シリンダーモジュール駆動電源、モジュール間およびモジュールとホストコンピュータ間のデータ通信に着目し、アーキテクチャの再設計を行うことにした。

3.1.1 電源システム

192本のシリンダーモジュールを全て同時に制御する上で、最大の問題は電流容量である。先に開発したシステムでは、同時に全てのパイプが動くことを想定しておらず、また、各モジュール機構の定格電流の総和として電源が設計されていた。したがって、駆動時の電流の変動や最大容量などを考慮した設計が必要である。各モジュール内のモーター（マブチモーター社製、RE-260）は5[V]下で、最大1.8[A]消費する。192本のモジュールの同時制御を行う場合、最大で $1.8[A] \times 192 = 345.6[A]$ の電流容量が必要になる。一般的な環境下において、スイッチング電源では電流を供給することは困難であるため、カート用バッテリー（日本電池社製 SEB130）を使用することにした。そして、12[V]→9[V]→5[V]の順で電圧降下し、最大出力が7[A]であることから、1個あたりに4個のモーターを駆動させるレギュレーター48個からなる電源システムを構築した。

3.1.2 データ通信

モジュールの増加に伴うデータ数および通信の処理負担の増加も重要な問題である。この問題に対し、ホストコンピュータが中層コントローラーを制御し、中層コントローラーが複数のモジュールを制御する階層構造からなるデータ通信方法を先に設計した。この手法を192本のモジュールから構成される本システム

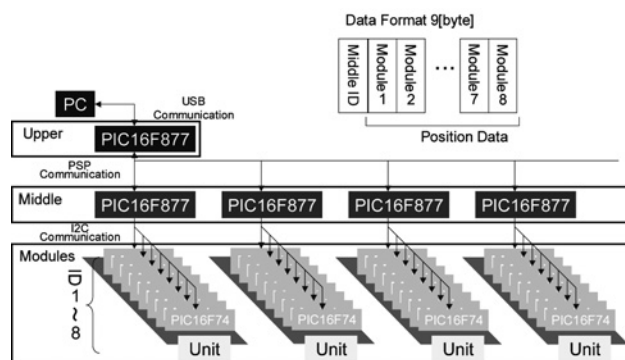


Fig. 2: Data communication architecture of “Interactive Spatial Copy Wall” display system

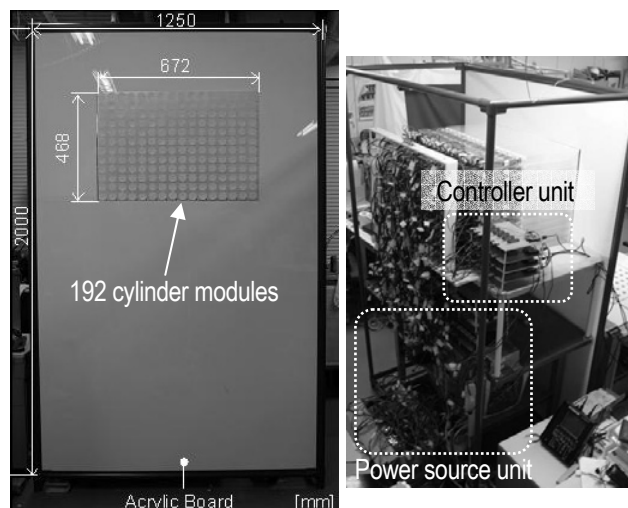


Fig. 3: Appearance of a display system

に実装した結果、通信停止することがたびたび確認された。中層コントローラーとモジュール間のI2C通信において通信異常が生じていることから、Philips社のI2C仕様書を確認したところ、バスの静電容量が400[pF]以下でなければならないことを見出した⁷⁾。そこで、通信経路における静電容量を低下させるために、中層コントローラーとモジュール間の配線を短くし、さらには中層コントローラーが統括するモジュールの個数を16個から8個に変更し実装した。そして、Fig.2に示すように、上層コントローラー(PIC16F877)1個、中層コントローラー(PIC16F877)6個から構成される回路を4個製作した。各中層コントローラーが8個の下層のモジュール(PIC16F74)を制御することで、192個のモジュールの制御が可能である。

続いて通信アルゴリズムについて説明する。ホストコンピュータから送信されるデータは、中層コントローラーIDの1[byte]、および8個のシリンダーモジュールの目標位置データの8[byte]からなる計9[byte]で構成される。ホストコンピュータはUSB通信で上層コントローラーにデータを送信する。上層コントローラーは中層コントローラーのIDを確認し、対象の中層コントローラーのみに対してPSP(Parallel Slave Port)通信を行う。このとき、対象以外の中層コントローラーはBusy信号を受信し、待機している。そして、中層コントローラーは受信したデータの1byteの位置データをI2C通信で各モジュールに送信する。モジュール

の ID はディップスイッチによって 8 個の内 1 つの ID が設定されている。その結果、各シリンダーモジュールは位置データを受信し、シリンダーの位置を制御する。同時に、シリンダーモジュールからホストコンピュータに対しては、中層コントローラーがその ID と 8 個の位置データを 1 つのパケットとしてまとめ、上層コントローラーを介してホストコンピュータへと送信する。このアーキテクチャを実装し、Fig.3 に示すディスプレイシステムを構築した。

3.1.3 GUI ソフト

ホストコンピュータから、直接各モジュールを操作するための GUI ソフトを開発した。この GUI ソフトは、上層、中層コントローラーのデータ通信の状況や各モジュールのシリンダーの位置を Fig.4 に示すように、同時に表示することが可能である。また、各シリンダーや各コントローラーは、その位置を数値入力したり、マウスでスライダーを操作することで、操作することが可能である。さらには、任意に作成した形状、位置から構成されるデータを入力することで、自動制御も可能である。

3.2 身体の立体形状計測

先に開発した身体の立体形状計測方法では、人物のみを抽出することが不十分であること、凹形状の認識ができないなどの問題があったため、下記に示す設計要件に基づき、計測システムを新たに開発することにした。

- ・様々な背景においても人物のみを計測
- ・人の通常対話における動きを計測(5[Hz]程度)
- ・姿勢の変化(最大で 45[deg]程度の回転・傾き)を計測
- ・凸形状のみならず凹形状を計測
- ・ディスプレイの精度(1 モジュール: $\Phi 30[\text{mm}]$, ストローク 250[mm])で人の立体形状と動きを計測

そこで、赤外線カメラと、身体モデルデータを組み合わせたステレオ画像計測法による身体の立体形状計測システムを開発した。

3.2.1 赤外線カメラとキャリブレーション

2 台のカメラによるステレオ計測法を行うためには、カメラキャリブレーションが必要である。一般のカメラでは、印刷物によるキャリブレーションテーブルを用いるが、赤外線カメラでは、通常の印刷物の形状を検出することができない。そこで、赤外線カメラ用のキャリブレーションボードを新たに考案した。ABS 樹脂製のボード(712.5×712.5[mm])上に、正方形(400×400[mm])の輪郭の溝を削り、その各辺上にラインヒーターを取り付け、その枠内に 49 個の円形($\Phi 25[\text{mm}]$)の穴を開けた。

また、2 台の赤外線カメラ(三菱電機, IR-SC1)はスチール製のラックに設置され、Fig.5 に示す範囲で撮影することが可能である。キャリブレーションの際には、上記の撮影領域内にキャリブレーションボード、その裏には電熱ヒーターを設置する。Fig.6 にキャリブレーション時の様子と、キャリブレーションボードの撮影画像を示す。

3.2.2 特徴点の検出

続いて、身体モデルを活用したステレオ計測法について説明する。当初は赤外線カメラのみによってステレオ計測法を試みたが、人体のみを検出するのは容易

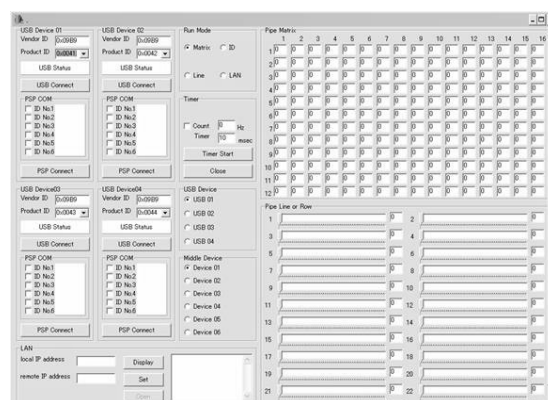


Fig. 4: GUI to motion and control every cylinder module and controller

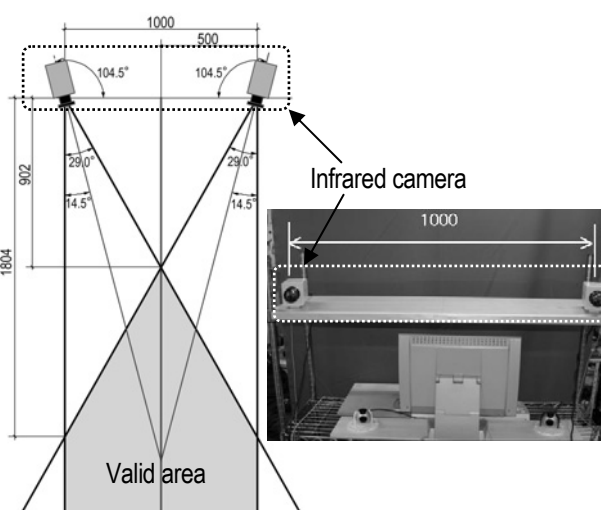


Fig.5: Two infrared cameras installed on the steel rack and its valid area

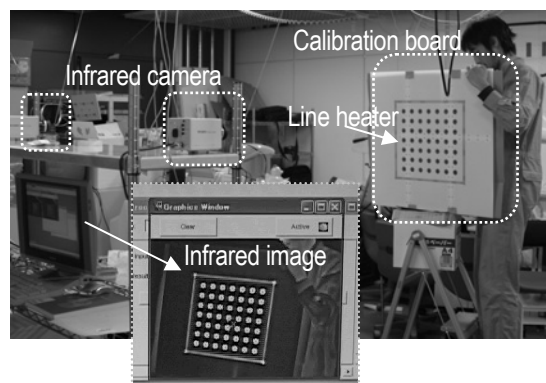


Fig.6: A scene in calibrating infrared camera

である一方で、赤外線画像内で身体の特徴点を決めるのが困難であった。そこで、特徴点として頭部、手、肘、胴体とともに、キャリブレーションボードに組み込んだ熱源マーカを利用する。そして、予め計測しておいた身体モデルデータ上の特徴点と赤外線画像中の特徴点とを対応させることにした。身体モデルの位置と姿勢を計算することで、最大で 192 点の空間的な位置情報を算出する。3 次元計測のアルゴリズムを下記に説明する。

(i) 身体モデルデータの作成

身体の立体形状を計測する前に、上半身の 3 次元モ

デルデータを作成する。Fig.7に示すように、胴体部に関しては10[cm]ごとの楕円形、頭部については5[cm]ごとの円形、腕に関しては肩から指先方向10[cm]ごとの円形の集合としてまずは設定する。そして、それら各断面の外周上に30[deg]ごとに頂点を設定し、隣り合う断面の頂点を順に結ぶことで数百個の三角形の集合体として身体モデルデータを作成する。現時点では、これらの計測、入力の手作業で行っている。

(ii) 特徴点の検出

赤外線画像において、身体の特徴点を安定して取得するために、Fig.8に示すように、被計測者の胴体前面には小型の熱源マーカーを4個、両肘には腕章型の熱源マーカーを装着する。そして、グレースケール、面積、真円度の3つの要素に着目することで、4つの胴体マーカーと2つの肘マーカー、両手の計8点が、赤外線画像において特徴点として識別される。

(iii) 身体的位置・姿勢の計測およびモデルデータとの対応

識別されたそれぞれの特徴点に対して一般的なステレオ計測法を適用することで、その3次元的な位置を算出し、そこから位置・姿勢の変化量を求める。それらの値を身体モデルデータに対応させることにより、実際の身体の動きを身体モデルの動きとして計算機上で再現する。その対応方法について次に詳細に説明する。

まず、位置については、Fig.9(a)に示すように胴体の4つのマーカーの重心位置の移動量を算出し、身体モデルデータ上の対応する重心位置において、それらの移動量を適用する。次に、姿勢については、Fig.9(b)に示すように、胸のマーカー同士をつなぐベクトルの外積ベクトルにより胴体の法線ベクトルを算出し、この法線ベクトルの変位を計算することで、胴体の回転と傾きを算出し、その量を身体モデルデータに適用する。そして、腕に関してはFig.9(c)に示すように、身体モデルデータの肩の位置を参照し、肘マーカーの中心、手の中心へとつなぐベクトルを各々算出し、身体モデルデータへ反映する。頭部に関しては、現時点では胴体に固定したままの状態を仮定している。

(iv) デプスマップの生成

最後に、身体モデルの座標系と実際の身体の座標系を対応付けることで、カメラの前の身体の立体情報の分布であるデプスマップを生成する。仮想カメラに向いている身体モデルを構成する三角形のみを検出するため、三角形の直角部分の外積から法線ベクトルを算出し、基準の仮想カメラからの光線ベクトルとの内積の正負で判断する。そして、選択された三角形の重心と基準平面との距離を、ディスプレイを構成するモジュールと同じ個数の192の格子点上において計算する。このようにして得られた192個の距離値の行列がモジュール内のシリンダーの位置を制御するためのデプスマップである。さらに、デプスマップを視覚化するために、仮想空間生成ライブラリー(World Tool Kit)を利用して仮想的な“Interactive Spatial Copy Wall”を構築し、Fig.10に示すようにリアルタイムでの表現を実現した。

3.3 “Interactive Spatial Copy Wall”の構築

192個のシリンダーモジュールと、立体形状計測システムを統合し、Fig.11に示す“Interactive Spatial Copy Wall”システムを構築した。192点の距離値からなるデ

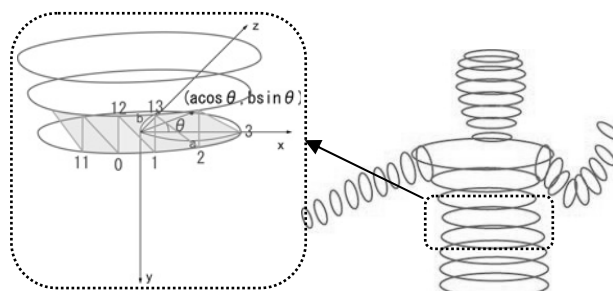


Fig. 7: A virtual human model

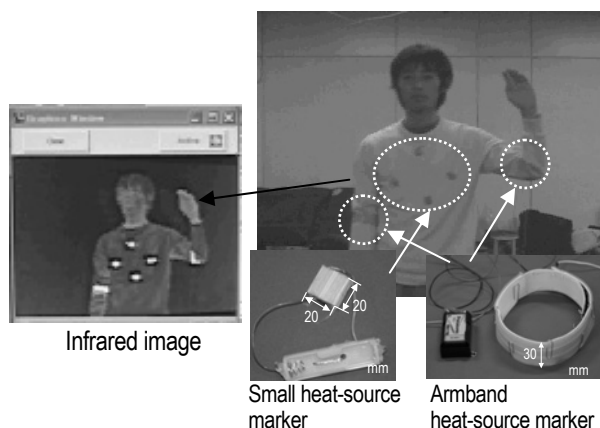
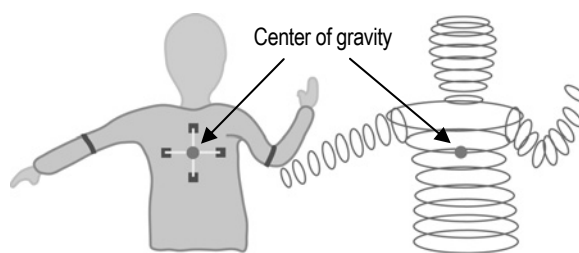
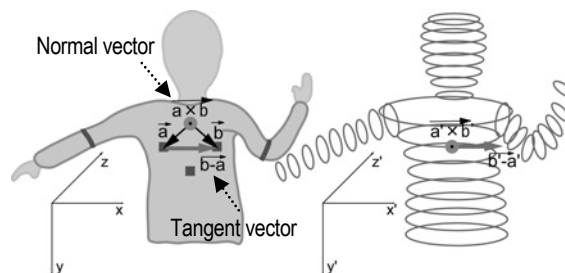


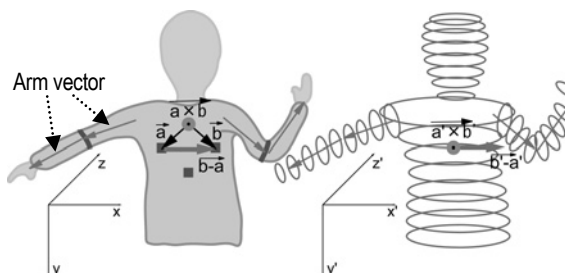
Fig. 8: Detecting specific points in infrared image



(a) Calculating the position of the body



(b) Calculating the posture of the body



(c) Calculating the position and posture of the arm

Fig. 9: Conforming specific points to virtual model

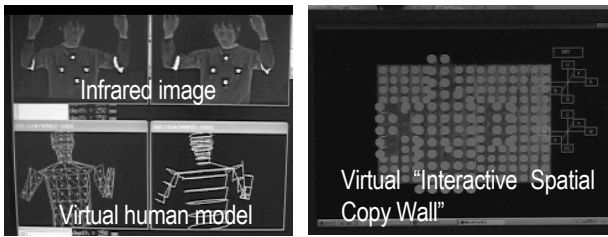


Fig. 10: Virtual “Interactive Spatial Copy Wall” to visualize a depth map

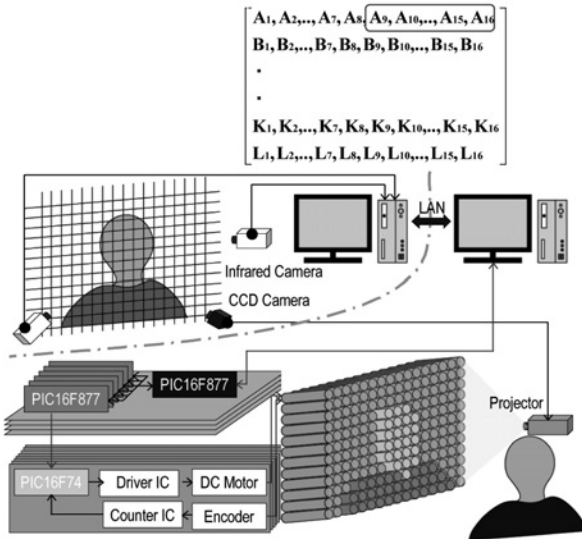


Fig. 11: Schematic diagram of “Interactive Spatial Copy Wall” display system

プスマップは、LAN を介して相手のホストコンピューターから自身のホストコンピューターに送信される。そのデプスマップは、ディスプレイのモジュール行列に対応した 16×12 の行列データに変換される。そして、行列における 1 行目の 1 列から 8 列までのデータ、同行目の 9 列から 16 列までのデータというように $8[\text{byte}]$ ごとのデータを、中層コントローラーの ID を加えてパケット化 ($9[\text{byte}]$) する。パケット化されたデータは前節で述べた通信方法に基づき各モジュールに配信される。これにより、各モジュールがシリンダーの位置を制御することで、相手の身体の立体形状を 3 次元的に再現する。また、ディスプレイの周りにはアクリルボードのスクリーンで囲われ、相手の正面に設置した CCD カメラが撮影した映像をプロジェクターにより投影する。

4 “Interactive Spatial Copy Wall”による表現

新たに開発した“Interactive Spatial Copy Wall”の性能について調査した。

まずは、ホストコンピューターから GUI を介して数値データを入力することで各シリンダーモジュールを制御した。その結果、各モジュールにおいて位置データは $10[\text{Hz}]$ 程度で更新することが明らかになった。また、予め生成した任意の形状のデータを入力することで、Fig. 12 に示すように、異なる形状の図形を自在に表現することも実現した。

なお、192 本の同時制御も Fig. 13 に示すように可能

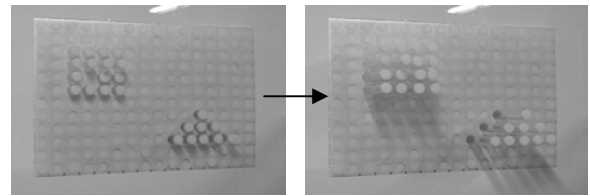


Fig. 12: A scene of displaying various figures

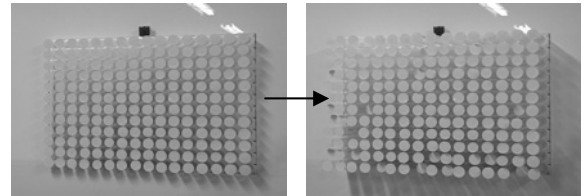
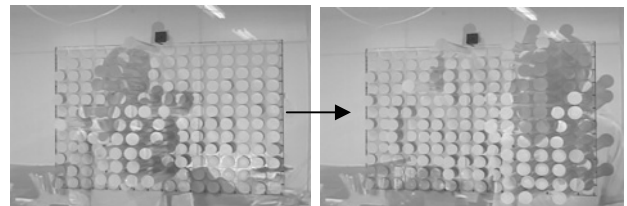


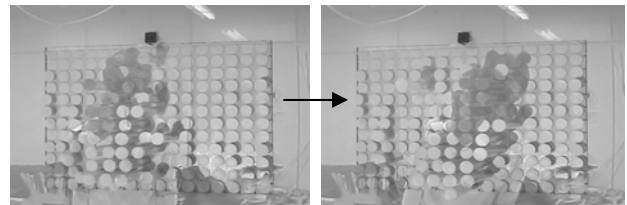
Fig. 13: A scene of controlling all of 192 modules



Fig. 14: Displaying a three-dimensional appearance of a person with video projection



(a) A person moves alongside.



(b) A person inclines his body.

Fig. 15: Scenes of displaying bodily actions of a remote person in three dimensions with video projection

であり、これにより電源容量の問題が解決できていることを明らかにした。

さらに、Fig. 14 に示すように、写真を元に手作業で作成した身体の立体形状のデータを入力し、その映像を同時に投影することを試みた。この表現から、身体の輪郭として認識可能であること、投影するビデオ映像から相手が誰であるのか認識しやすいことが示唆された。

続いて、本ディスプレイシステムの動作試験を以下のように行った。被計測者の衣服に熱源マーカを取り付け、デプスマップ生成のフレームレートについて

調査した。その結果、デプスマップは5-6[fps]で更新され、要求諸元である対話時の動きを表現できる速度で処理可能であることを確認した。

次に実際の身体の立体形状の精度を調査する代わりに、熱源マーカの特徴点の位置について検討した。その結果、Fig.5 に示した領域内では、マーカ位置誤差は最大で2[cm]程度であった。

また、身体の姿勢については、ヨー角（鉛直軸回りの回転）の計測可能角度は最大で50[deg]程度であった。それ以上回転すると、胴体の熱源マーカが認識できなくなった。そして、ロール角（身体の視線方向の法線ベクトル回りの回転）の計測可能角度は最大で45[deg]程度であり、それ以上回転すると、胴体の熱源マーカ同士の判別ができなくなった。

最後に、“Interactive Spatial Copy Wall”が3次元的に相手の身体の動きを表現しているときの様子を Fig.15 に示す。身体の前後や横、斜めの動きに対して、シリンダーが移動している様子が分かる。

5 考察

複数本のピンやパイプの位置を変化させる方法に基づき、仮想オブジェクトや人を表現するシステムはこれまでにいくつか提案されている。例えば、Feelex は、36本の直動アクチュエータ（直径4[cm]、ストローク80[mm]）の上に、ゴムプレートとナイロン生地のスクリン240×240[mm]を張り、上下動変化に合わせて映像を投影することが可能である⁸⁾。また、PopUpは両手の範囲において、コイル状の形状記憶合金により256本のピンを制御することができる⁹⁾。これらのシステムは、本システムと比較して、両手で覆う程度の表現領域を対象としており、上半身のサイズで表現することを対象としていない。また、ストロークにおいては本システム以上に表現が可能である Interactive Kinetic Façade も提案されているが、各パイプの間隔が広いと身体の動きを再現するには、不向きである¹⁰⁾。

以上に示したように、本システムにおいて、200本程度のシリンダーの直動を制御する方法により、上半身の動きを立体的に表現することに初めて成功したといえる。しかしながら Fig.15 に示したように、身体の輪郭はあいまいであり、その原因として各モジュールの特性が異なること、身体の立体形状計測の精度が充分でないことが考えられる。

各モジュールには同じソフトが実装されているが、モーターや駆動機構の特性が各モジュールによって異なるため、信号を同時にモジュールが受信しても、応答の差により、身体が移動している時にはばらつきが目立つことになる。これについては、各モジュールに最適な調整を施すことや各モジュールの反応速度を速めることで解決できると考えられる。

次に、立体形状をより正確に計測する必要がある。身体モデルも併用するならば、3次元スキャナーを利用することで、自動的かつより正確な身体モデルの生成を可能にし、さらにはそのモデルと実際の人との特徴点をより一致させることができよう。また、身体モデルを利用するのではなく、直接身体の立体形状を計測するなどの方法も検討する必要がある。

6 まとめ

昨今では遠隔の相手との一体感や安心感を創出する技術が社会的に要請されているものの、その技術や表現手法は発展途上であるといえよう。このような問題に対して著者らは、行為者の映像とロボットや実体の動きを組み合わせる表現手法を先に考案し、ディスプレイシステムを開発してきた。

本研究では、複数本のピンの動きと行為者の映像を組み合わせる先に提案した方法に基づき、遠隔の相手の上半身の動きを立体的に表現するシステムの開発を試みた。そこで、電源システムと通信システムを再設計するとともに、身体の立体形状計測システムを新たに考案し、システムとして実装した。その結果、上半身サイズで身体の立体的な動きを再現することに初めて成功した。今後は、身体の高さなどをより正確に表現するために、モジュールの調整や立体形状計測の手法について検討していく。

謝辞

本研究の一部は、岐阜県からの委託である WABOT-HOUSE プロジェクトにより行われた。また、本研究のシステム構築にあたり、学部生の内山高志君の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 宮島, 伊藤, 伊東, 渡邊: つながり感通信: 人間関係の維持・構築を目的としたコミュニケーション環境の設計と家族成員間における検証; ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌, Vol.5, No.2, pp.171-180 (2003).
- 2) 例えば, みまもりほっとライン:
<http://www.mimamori.net/index.html> など
- 3) 清水, 久米, 三輪, 三宅: 場と共創; NTT 出版 (2000).
- 4) Miwa, Y., Wesugi, S., Ishibiki, C., & Itai, S.: Embodied interface for emergence and co-share of 'Ba', Usability Evaluation and Interface Design, Proc. 9th Int. Conf. on Human-Computer Interaction, pp.248-252 (2001).
- 5) 上杉, 三輪: 身体の高さ表現と実体ツールとのインタラクションによる共存在的コミュニケーションシステム, ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌, Vol.6, No.3, pp.295-305 (2004).
- 6) 石川, 上杉, 三輪: 異なる身体空間を統合する”Interactive Spatial Copy Wall”の開発; 情報処理学会第66回全国大会講演論文集(4), pp.21-22 (2004).
- 7) Philips; I2C-bus specification:
<http://www.semiconductors.philips.com/markets/mms/protocols/i2c/>
- 8) Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F., & Kawamura, R.: Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics; Proc. 28th ACM Int. Conf. on Computer graphics and interactive techniques, pp.469-476 (2001).
- 9) Nakatani, M., Kajimoto, H., Sekiguchi, D., Kawakami, N., & Tachi, S.: 3D Form Display with Shape Memory Alloy; Proc. 13th Int. Conf. on Artificial reality and Telexistence, pp.179-184 (2003).
- 10) Kilian, A., Oron, R. (RoArt Inc.), & mafox: Interactive Kinetic Façade; <http://kdg.mit.edu/Projects/p13.html>