

コイル状形状記憶合金を用いた 3次元形状ディスプレイの研究

Pop Up!: 3D Form Display with Coil-type Shape Memory Alloy

仲谷正史[†], 梶本裕之[†], Kevin Vlack^{††},
関口大陸[†], 川上直樹[†], 舘 暲[†]

Masashi Nakatani[†], Hiroyuki Kajimoto[†], Kevin Vlack^{††},
Dairoku Sekiguchi[†], Naoki Kawakami[†] and Susumu Tachi[†]

Abstract We developed a display for presenting 3-D shapes using a pin-rod matrix. Due to a wide range of movement, the display is capable of presenting large-scale, dense objects such as human faces or geographical features. We used a coil-type shape memory alloy as a pin-rod actuator for building our display. We first designed and evaluated the system components. We then constructed three different prototypes. The first prototype has a 1x64-pin-rod matrix, and each of the other two has a 16x16-pin-rod matrix. The prototypes have a 30-mm range of motion and a 5-mm pin interval. The prototypes are sufficiently accurate for presenting subtle surface structures. Our goal is developing a dynamic display that moves in real-time and that also works as both an output and input interface.

キーワード：3次元ディスプレイ, 形状記憶合金, 形状表示, ピンマトリクス, バーチャルリアリティ

1. はじめに

実世界に存在する物体の3次元形状を計測し、情報空間に取込むという試みは、レンジファインダ等の計測装置の発展に伴い、最近では盛んに行われている。その応用先は、取り込んだ実物体データを情報空間内で加工する用途や美術品や歴史的建造物をアーカイブ化する用途¹⁾など、多岐にわたる。

一方で、これらの計測技術によって得られた形状データは、情報空間内で3Dモデルとして再構築したうえで、視覚表示することが可能である。2次元視覚装置(例えば、CRTやLCDなど)による表示は、近年の技術発展により解像度や色表現が改善され、リアリティの高い表示が可能になっている。しかし、任意視点からの観測には、視点位置を取得した上で表示する情報を決定する必要がある。

また別の手法として、3Dモデルの体積を機械的に再現することも可能である。玩具店で見かけることのできる図

1右下(b)のようなピンマトリクス型のディスプレイはその一例であり、下部より表示したい物体を押し当てることで再現性高く体積や表面形状の型を取ることができる。一方で、前者の方法のような高解像度の情報表示は難しい。

このように3次元情報表示には様々な手法が考えられるが、高解像度の視覚情報表示が必要ではなく、多くの人が同時にディスプレイを見て情報共有を行うことが求められる場面(例えば、図2に示す複数人で行う景観設計など)では、後者は有効な手段である。なぜなら、体積そのものが再現されていることから、観察者数の増減にかかわらず、常に3次元情報表示ができるからである。そこで我々は、3次元形状ディスプレイとして体積表示に十分なストロークを持った、高密度ピンマトリクスで構成されたシステムについて考える。提案するシステムは、上下動するピンロッドによって自由に形状が変化できるディスプレイ装置であるが、特に本稿では「目標形状に遷移」し、「その形状を一定時間保持」し、「次の形状に遷移する」の動作を繰り返す(これを本稿では『準静的な形状表示』と呼ぶ)ことが可能なシステムである。以下の節において、3次元形状ディスプレイに求められる必要要件を考察し、コイル状形状記憶合金を利用した実装方法を提案し、試作から得た知見を述べる。

2. 3次元形状ディスプレイと背景

2.1 3次元形状ディスプレイが持つべき要件

本節では、我々が実現しようとするピンマトリクスによ

2004年11月1日受付, 2005年9月5日最終受付, 2005年11月25日採録

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{††} 東京大学大学院 情報学環・学際情報学府

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan)

^{††} Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan)

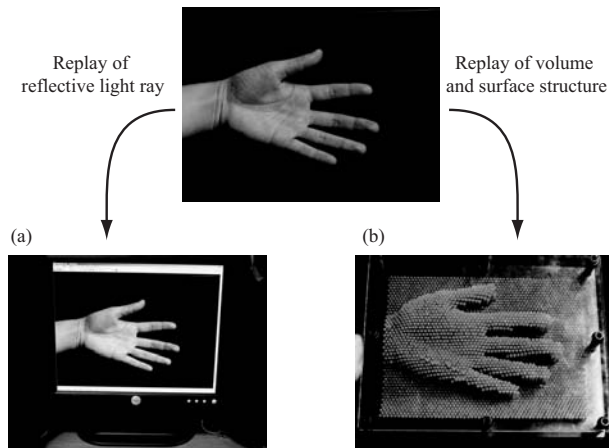


図 1 3次元形状を呈示する二つの手法
Two methods for displaying 3D shapes.

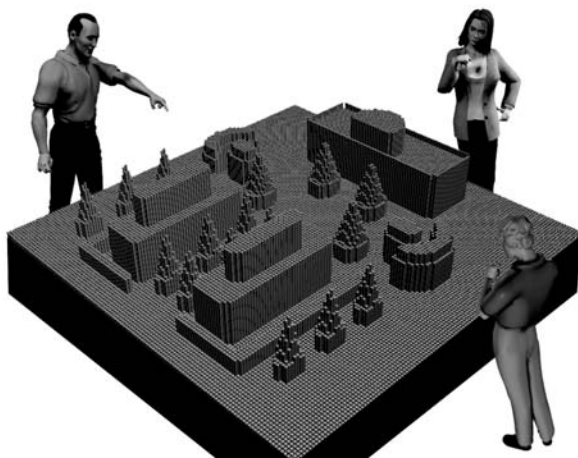


図 2 ピンマトリクス型3次元形状ディスプレイの使用場面
Example application of a pin-rod matrix type 3D shape display.

る3次元形状ディスプレイ（以下、3次元形状ディスプレイとする）に必要な技術構成要素について考える。図3に代表的な必要要件を4点示す。それは、

- (1) 起伏形状を呈示するために、奥行き方向の十分なダイナミックレンジ（作動ストローク）を有すること
- (2) 細かな起伏を呈示するために、奥行き方向に高い分解能を有すること
- (3) なめらかな形状呈示をするために、隣り合う画素が高密度に配置されていること
- (4) ディスプレイの画素数を自由に増減できるよう、拡張性に優れていること

である。本来ならばこれに加えて「観察者にとって画素の上下動によるちらつきが気にならないほど、各画素の時間分解能が高いこと」が考えうるが、本稿では準静的な形状呈示を目標とするため、呈示形状が遷移する最中の見え方については考慮しない。

2.2 具体的に求められる仕様の検討

—顔形状呈示を目標とした場合—

次にこれらの点について、具体的にどの程度の仕様を満たすと何の形状が呈示できるのかについて考える。それに

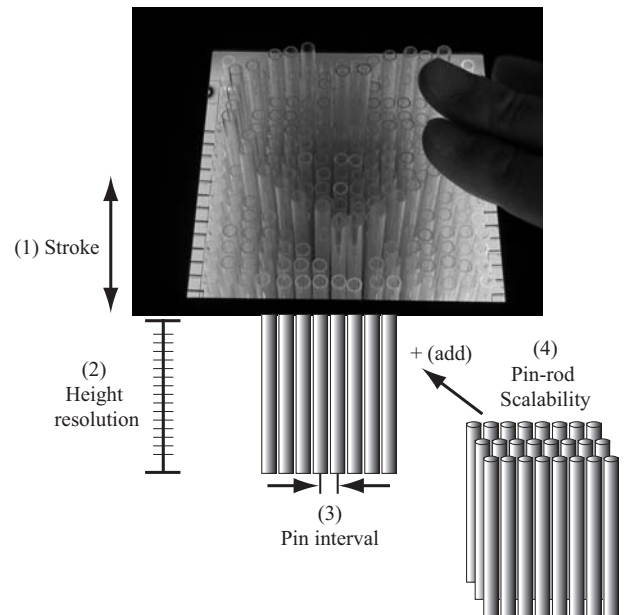


図 3 試作したディスプレイとそれに求められる要件
Developed prototype and its required dimensions.

際して、世の中に存在する形状すべてをカバーすることは難しいことから、ここでは上下の起伏差が激しくかつ滑らかな形状の身近な例として人間の顔表面形状をディスプレイし、観察者が「人間の顔である」と判別できることを想定して検討する。

(1) に関して、形状呈示のためにシステムが有すべきダイナミックレンジを考える。日本人成人男女約500名を対象に調べた人体寸法より、鼻尖と外眼角間の距離は平均33.3mm(男性平均36.7mm, 女性平均29.7mm)程度である²⁾。これより必要な高さ方向の最大作動ストロークは、30~40mmが目安となる。

(2) に関して、人間の奥行き感度は、観測点からディスプレイ面が1m離れているときには2mmの違いが弁別できることが知られている³⁾。観察者からディスプレイ面までの距離と奥行き弁別閾が比例関係にあると仮定すれば、ディスプレイ面が0.5m離れている場合には1mm、0.3m離れている場合には0.6mm程度の弁別が可能であると計算される。情報ディスプレイと観察者の間の適切な視距離は、労働省や日本電子工業振興会など複数の機関で示されているが、この中でもANSIが推奨する0.3mが最短推奨視距離である⁴⁾。ゆえにこの距離での奥行き弁別閾0.6mm程度を有すれば、ほとんどの推奨視距離からディスプレイ面を見ても滑らかな起伏形状の呈示が可能と考えられる。

以上より、最大作動ストローク量を高さ方向の最小分解能0.6mmで割った数、すなわち50~67段階程度の高さ調節ができると、人間の顔形状が呈示可能となると考えられる。

(4) に関して、形状呈示に必要な水平方向の画素数は形状そのものを認知する上で重要であるため、可能な限り画素数は多いことが理想的である。もし呈示するものが文字形

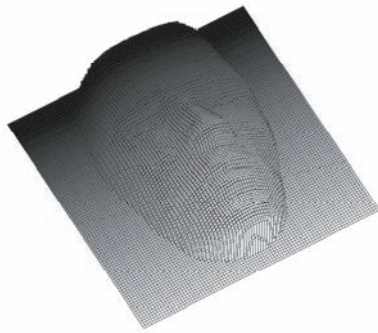


図 4 顔形状呈示シミュレーション実験に用いたレンジファインダデータ。
Original rangefinder data of human face for resolution requirement analysis.

状である場合、英数字であれば 5×7 ピクセル、漢字であれば、 6×11 ピクセルが最低限必要であるとされる⁵⁾。また、WINDOWSのGUIアイコンの画素数は最低で 16×16 で構成されており、少なくともこれだけの画素数があれば、単純な図柄が呈示可能であるという経験則を教えている。しかしながら、提案するディスプレイの最終的な目標は、何らかの3次元構造物を呈示することであるから、少なくともこれ以上のピクセル数が必要と予想される。そこで、実測した顔形状のレンジファインダデータ(128段階の奥行き分解能、図4参照)を用いて、画素数を間引いていった場合の形状をCGシミュレーションした形状を5人の被験者に見せ、何ピクセル以上あれば人間の顔として自然な表現ができていくのかについて図5を見せて、5人の被験者に対して官能評価を行った。その結果、 45×45 ピクセル(2025点サンプリング)以上あれば顔形状として充分確認できることがわかった。筆者らの主観ではあるが、 30×30 ピクセルの場合と、 45×45 ピクセルの間には、大きな隔たりがあると感じられた。

(3)に関して、文字・記号表示では画素ピッチが視角 $1'$ 以下であることが通常の視覚ディスプレイでは望まれる⁶⁾。可能な限り画素間隔は、細かいほどより詳細な形状呈示が実現できるが、本稿ではアクチュエータの制約上可能な限り画素ピッチを細かくすることで、この点に関しては対処する。

本節をまとめると、 0.6mm の高さ分解能で最低50~67段階、 30mm 以上の作動ストロークを有し、 45×45 ピクセル以上の画素数を持てば、顔のような起伏形状を人が認識できる程度で呈示可能である。そこで我々は、これらの仕様を参考としながら、以下に述べるディスプレイの設計指針の一助とした。

2.3 先行研究との比較

前節の考察を踏まえて、本節では先行研究に触れ、我々の提案するディスプレイの新規性を述べる。これまでにピンマトリクスを利用して、物理的に立体形状を再構築する研究は数多く行われてきた。その多くは、触覚表現を目的

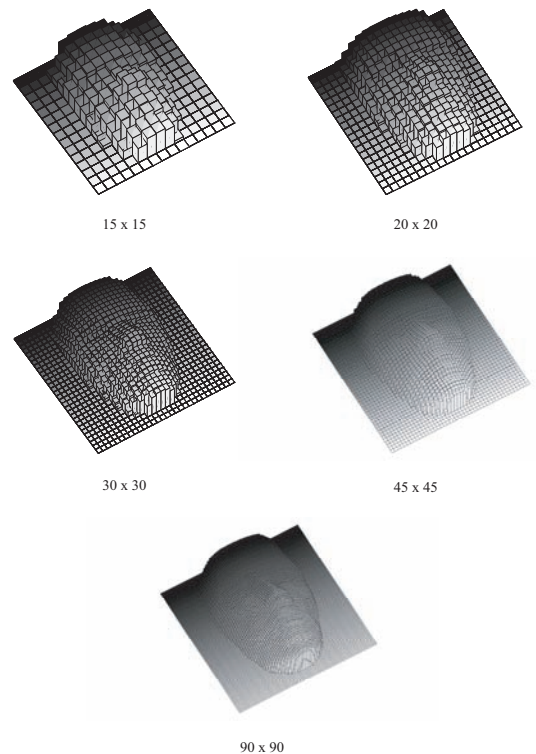


図 5 顔形状呈示に必要なピンロッド本数のシミュレーション実験結果。図中の数字は、 $x \times x$ のピンマトリクスであることを表す。

Matrix size simulation for the human face. Numbers in the figure indicates the number of pin-rods.

としたディスプレイとして、古くはカメラで取得した文字形状を指先に呈示するOPTACON⁷⁾に始まり、それより数多くの研究が行われている。高密度なピンマトリクスを構成するためには、 piezo素子⁸⁾やソレノイドコイル⁹⁾を利用したディスプレイが提案されている。これらの小型アクチュエータは、直径 1.3mm のピンロッドを用いて二つのピンロッド間隔を最小 2.4mm で配置したピンマトリクス構成を実現しているが、奥行き方向に数 \cdot のストロークしか持たないため、長大なストロークや奥行き方向の分解能を持たせることが困難であった。一方、ピンロッドに長大な作動ストロークや十分な力呈示能力を持たせるために、サーボモータ^{10)~13)}を用いたディスプレイが数多く提案されている。これらは最大 30mm 前後の作動ストローク呈示、数 N の力呈示を実現しているが、アクチュエータのサイズが大きいため、ピンマトリクスへの動力伝達機構が複雑となり、高集積化や製作・メンテナンス等が困難であった。以上より、数十 mm を超える長大なストロークを持ち、なおかつ高密度化を実現したピンマトリクス型ディスプレイは、これまでに存在していなかった。ゆえに、我々の提案するディスプレイシステムはこの2点を同時に満たすことで新規性があるものと考えられる。

3. 提案手法とその評価

3次元形状ディスプレイが所望の形状を呈示するには、

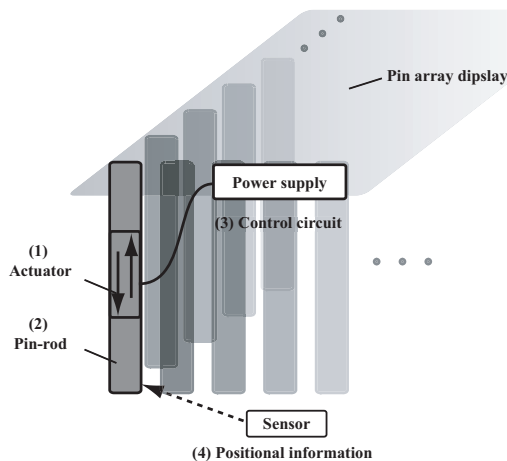


図 6 ピンマトリクス型 3 次元形状ディスプレイの 4 つの重要なシステム構成要素

Four important components of pin-rod matrix type 3D shape display.

- (1) アクチュエータを駆動し、
- (2) ピンロッドの高さを変化させるために、
- (3) 駆動回路を通して制御信号を与え、
- (4) 所望の形状になるようピンロッドの現在位置を計測し、(1)に戻る。

という手順を繰り返せばよい(図 6 参照)。一方で前章 2.1 節の議論から、人間の顔のような起伏差のある物体を 3 次元形状ディスプレイで呈示する際に目安となる作動ストローク量・奥行き分解能・ピンロッド本数等の仕様が判明した。本節では、図 6 の 4 点のシステム構成要素について、我々の提案する設計について述べる。

3.1 アクチュエータ

長大なストロークを持ち高密度配置が可能なアクチュエータとして、我々はコイル状に加工した形状記憶合金 (Coil-type Shape Memory Alloy, 以下 C-SMA と呼ぶ。コイル径: 0.85mm, 線径: 200 μ m) を採用した。過去にはワイヤ状の形状記憶合金を用いたピンマトリクス型触覚ディスプレイの研究がいくつか提案されている^{14)~16)}。しかしながら、ワイヤ状記憶合金は自長の数%しか縮まず、結果ピンロッドの最大作動ストロークは 2-3mm と短かった。一方で今回採用した C-SMA は、加熱すると伸張後の長さの約 50%にまで収縮させること(例えば、10mm に伸ばせる長さであれば、5mm まで収縮させること)ができる。

本研究で用いる C-SMA の抵抗値は 0.2 Ω /mm 程度であり、駆動の際には電圧の印加して C-SMA にジュール熱を発生させ、自身を縮ませる(図 7 参照)。よって C-SMA を高速に収縮させるためには、高電圧を印加すればよい。一方で、C-SMA を伸張させるためには、蓄積された熱を取り去った上で牽引する必要があるが、冷却が不十分であると伸張動作に時間がかかってしまう。したがって、C-SMA の応答性は冷却手法で決まると言ってもよい。

一方で、C-SMA の応答性は 3 次元形状ディスプレイの実現そのものには影響は与えないが、呈示形状の遷移にかか

る時間は極力抑えるべきである。そこで、C-SMA1 本に関して、様々な冷却条件下における時間応答性能を詳しく調べ、駆動電圧等のディスプレイのパラメータ設計の方針を立てた。評価実験では、C-SMA の一端にスプリング(バネ定数 $k = 2.69\text{N/m}$)を取り付け、その伸張した量(= C-SMA の収縮した量)に応じて C-SMA の伸張方向に力を加えた。ピンロッドを図 7 のように C-SMA とスプリングの間に取り付け、C-SMA の収縮・伸張動作がピンロッドの上下方向の駆動力になるよう、固定具兼電極は上下にある台に固定されている。

冷却方法として、最も吸熱が期待されるのは液冷であるが、液体の出し入れをコンパクトな機構に収めることは難しく、この冷却手段を採用する場合には、常に C-SMA を液体中に浸しておかなければならない。そのため、常に冷却が行われ、低電圧下では駆動に時間が必要である。一方で空冷は冷却力が弱いといった短所がある反面、必要なときだけ冷却できるという強みがある。よって、我々は実験として、

- (1) 何も冷却手段を講じない(自然冷却)
- (2) 冷却液に浸す
(42-50% エチレングリコール, 18.5 $^{\circ}\text{C}$)

(3) C-SMA を収縮させるときだけ空冷を行う
の三つの冷却条件において C-SMA を駆動し、ピンロッドの位置変化量を観測することで性能評価を行った。実験環境の室温は 22.1 $^{\circ}\text{C}$ であり、またピンロッドの位置計測には光学式リニアエンコーダ(位置分解能 1mm)を用いた。

図 8 (a) に 3 条件下で C-SMA に 12V の矩形波を印加したときの応答特性を示す。空冷のみ(条件 1)の場合には、短時間で C-SMA は収縮するが、一方で伸張には 15sec 必要であった。また、液冷(条件 2)の場合には、12V では十分に収縮しなかった。これは強い冷却効果のために C-SMA が動作温度に達しなかったと考えられる。一方で、風冷で冷却タイミングを制御する(条件 3)場合は、短時間で最大ストローク(本実験系では約 30mm)を呈示してすぐに元の位置に戻り、もっとも理想的な動作を実現した。

追加実験として、同じ冷却液下において、40V のパルスと同じ時間だけ印加した場合の応答特性を図 8 (b) に示す。その場合、C-SMA は非常に高速な応答特性を示し、さらに最大 1Hz で駆動できることを確認した。

以上の評価実験から、高い時間応答性が不要でない場合は、低電圧で駆動して風冷によって穏やかな冷却を行えばよく、必要な場合には高電圧で駆動し冷却液に浸して常に強制冷却を行えばよいことがわかった。実際には、形状呈示に求められる時間応答性や電源の電流容量等の制約を考慮して C-SMA への印加電圧と冷却条件を決めればよい。

このように長大な作動ストロークが期待でき、かつ高密度配置ができるほど非常に細いアクチュエータである点において、我々の提案する 3 次元形状ディスプレイにとって適切なアクチュエータと言える。一方で時間応答性は最高

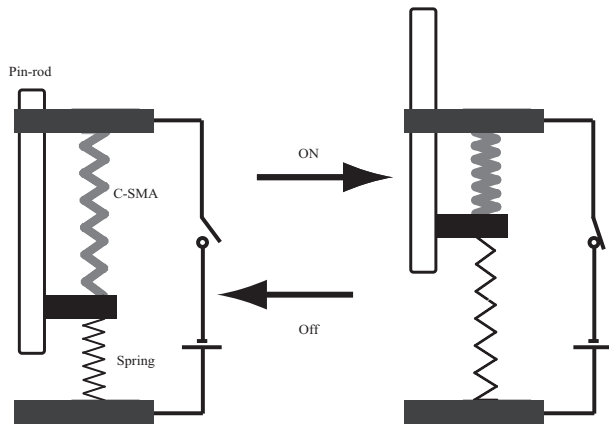


図 7 C-SMA とピンロッドの駆動原理
Driving principle of C-SMA and Pin-rod.

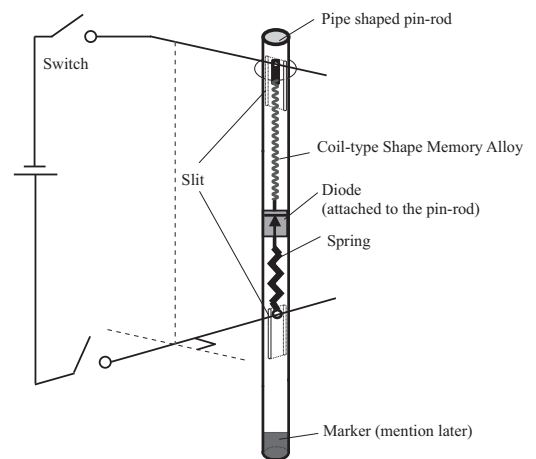


図 9 ピンロッドの構成
The configuration of single pin-rod.

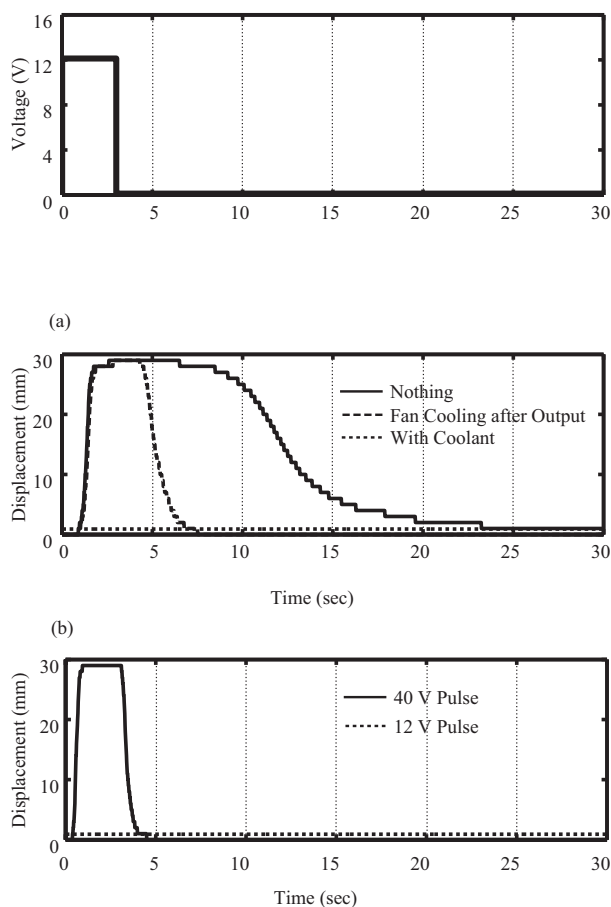


図 8 (a):さまざまな冷却条件下におけるコイル形状記憶合金の動作評価
(b):冷却液化の C-SMA に 12V,40V のパルスを加えた際の挙動
(a):Evaluating C-SMA under various conditions.
(b):Actuating C-SMA with 12V and 40 V pulse under soaked with coolant condition.

で 1Hz 程度ではあるが、形状の準静的呈示に限れば許容できる性能であると考えた。

3.2 ピンロッド

ディスプレイ面が高密度であるためには、ピンロッドが可能な限り細いことが望ましい。一方で、C-SMA をあまりに高密度に隣り合わせてしまうと、駆動している C-SMA に生じた熱が近傍のピンロッドの C-SMA に影響を与える懸念がある。また、冷却媒体の循環が滞り熱交換が不充分

となった結果、冷却効果が薄れてしまうと考えられる。

そこで我々は、ピンロッドに図 9 のように中空な形状を用いて、その内部に C-SMA・スプリング等のアクチュエータ類を内蔵した。ピンロッドの側面には細いスリットが上下 2 箇所、ピンロッドを貫通するように彫られており、下方もしくは側方からの冷却媒体の通り道として機能する。スリットからは次節で述べるマトリクス駆動を実現するよう上から見て電極が直交する方向から上下それぞれ挿入しており、ここより C-SMA への給電を行う。また、このスリットは作動ストローク長だけ切ることで、最大作動ストローク長を規定するストッパーとしての役目も果たす。以上の工夫によって、隣り合う C-SMA 間の電気的絶縁や断熱ができ、冷却媒体の通り道が確保され、高密度配置に対応でき、ディスプレイの拡張性が維持できる。

3.3 駆動回路

ピンマトリクスが高密度配置されている場合、ディスプレイ面は多数のピンロッドによって構成されるため、それを想定した駆動回路を考えることが必要である。そこで我々は、LCD や LED のダイナミック駆動で広く用いられているマトリクス駆動回路を採用した。図 10 に採用した駆動回路の概要を示す。アクチュエータの上部および下部にスイッチ群を配置し、マトリクス状の電気配線によってピンロッドを駆動をする。この手法の特徴は、一つのピンロッドを駆動するために二つのスイッチを必要とするが、ピンロッドが増加しても、制御命令の数の増大を抑えることができる点である。実際、 $N \times N$ ピンマトリクスの場合、制御命令数は高々 $2N$ で済むことになる。

3.4 位置計測

可動範囲内で様々な奥行き的位置にピンロッドを制御するためには、ピンロッドの現在位置を取得することでフィードバック制御量を決定しなければならない。ピンロッドの位置計測には様々な手法が考えられ、それらは大きく分けて (1) 形状記憶合金の物性変化 (温度変化, 抵抗値変化等) を利用する手法と、(2) ピンロッドの位置を実測する手法

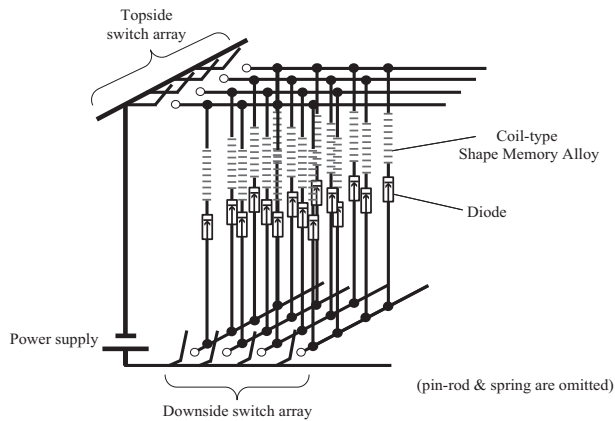


図 10 マトリクス駆動回路
Matrix drive circuit. The number of actuators is $N \times N$, but the control input size is $2N$.

の二つである。前者に関して、Ikutaらはワイヤ形状記憶合金が加熱にもなって抵抗値が低下するという物性を利用して、現在の形状記憶合金の長さを求める手法を提案している¹⁷⁾。これに対し、我々は後者の手法を採用する必要があった。なぜならば、コイル形状記憶合金もワイヤ状と同様に、駆動に伴って抵抗値が低下するが、一方で繰り返し駆動によって元の圧縮したコイル形状には完全に戻らない。結果、徐々に全長が伸びてしまい、前者のように既に取得したモデルを用いた手法が長期間にわたって機能しないからである。この点はまた本システムをフィードフォワード制御で完全には駆動できない理由でもある。

そこで我々は、過去にリニアエンコーダによる計測手法を採用した¹⁸⁾¹⁹⁾。しかしこの手法では各々のピンロッドの近傍にセンサ素子等を配置する必要があるため、このことがピンマトリクス高密度化の大きな障害となっていた。ゆえに、マトリクス上にピンロッドを並べる際には、カメラによって各ピンロッド下部のマーカを側面からリアルタイムに撮像し、画像処理によって現在位置を取得する手法を採用した。

図 11 にその概念図を示す。各ピンロッドはマトリクス状に配置され、その行数が増えるごとにディスプレイ下部の長さが増すよう階段状に設計する。認識精度を高めるために各ピンロッドには赤・緑・青・黄の4色のうち1色のマーカを、同じ色が隣り合わないような配色で塗布する。各行のピンロッドの長さは、本ディスプレイの最大ストローク分だけ、カメラから遠ざかるごとに長くなるように設計する。このことで、各マーカがカメラに近い側にあるピンロッドによって遮られることなく、常に観測できる状態を作り出すことができる。提案するカメラによる位置計測手法によって、ピンロッドをほぼその直径の間隔で密集させることが可能であり、これより高密度なディスプレイの構築を実現できる。

前述の通り、各画素の最大ストローク長はピンロッドに作られたスリットにより規定しているため、マーカのトラッ

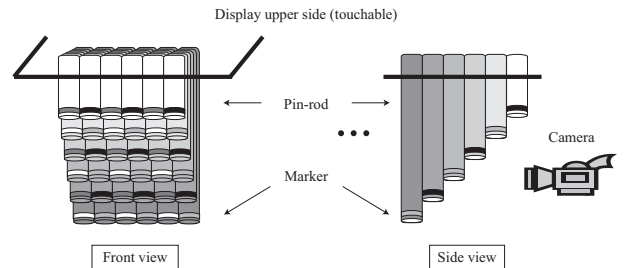


図 11 カメラによるピンロッドの位置計測手法
Measurement method of pin-rod position with camera.

表 1 3次元形状ディスプレイの必要要件と提案手法の関係
Relationship between requirement for 3D display and our devised method.

	長大なストローク	高分解能	高密度	拡張性
C-SMA	○	—	○	—
ピンロッドの形状	—	—	○	○
駆動回路	—	—	○	○
カメラによる位置計測	—	○	○	—

キング範囲を限定することができる。ゆえに画像処理による計算負荷も最小限に食い止めることができる。一般に、カメラによる位置計測手法は、高い時間分解能が必要なシステムに対してはボトルネックとなりうるが、本システムが目指す3次元形状の準静的呈示に対しては、ピンマトリクスの高密度化を同時に実現できる点も考慮に入れば、リニアエンコーダを分散的に配置する手法に対する一つの代替案と考えられる。

3.5 提案手法のまとめ

本章では、3次元形状ディスプレイの必要要件4点(図3)を満たすための手法を提案した。これらの提案手法がどの必要要件にとって有効であるか表1にまとめた。これを踏まえて次章では実際にシステムを試作した結果を述べ、これまでの考察の妥当性を示す。

4. プロトタイプの製作

我々の製作したプロトタイプは、すべて最大30mmのストローク呈示能力を持ち、ピンロッド間隔は5mmとした。ピンロッドとしてバックライトの合板(1辺4mm、プロトタイプ1, 3)もしくはアクリルパイプ(直径4mm、プロトタイプ2)を用いた。

4.1 プロトタイプ1: 1×64ピンマトリクス

マトリクス状にピンロッドを配置する前段階として、バックライトを使用した64本のピンロッドを1次元アレイにならべたプロトタイプを構築した。C-SMAの冷却はピンマトリクス近傍に空冷ファンを配置し常に風冷を行った。位置検出にはリニアエンコーダを使用し、分解能は0.1~0.2mmであった。図12に示すように、波形状が右から左へ移動する様子の呈示実験を行った。Microchips社製PIC16F877をコントローラとして使用し、リニアエンコーダは赤色LEDとフォトフレクタによって構成した。

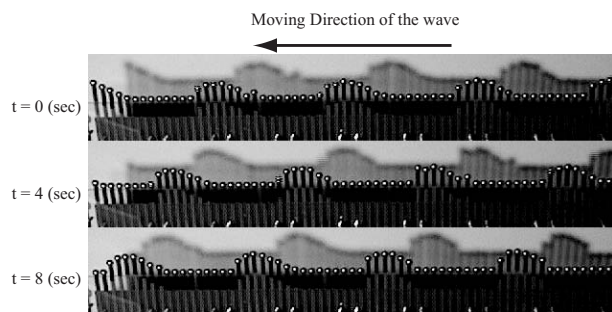


図 12 1 × 64 ピンマトリクスによる波形状が移動する様子の呈示

1 × 64 pin-rod matrix prototype presenting waveform movement.

表 2 プロトタイプ 2 の実装に用いた計算機の仕様
Computer specification for controlling prototype 2.

項目	詳細
CPU	Intel Pentium 4, 2.8GHz
Camera	Point Grey Research Streaming Dragonfly × (解像度 640 × 640 RGB, 30fps)
Compiler	Intel C/C++ Compiler 8.0

4.2 プロトタイプ 2 : 16 × 16 ピンマトリクス

前節のプロトタイプを踏まえて、アクリルパイプを使用した 16 × 16 のピンマトリクスで構成したプロトタイプを次に製作した。C-SMA の冷却はピンマトリクスの中心部まで十分に冷却できるように、常に空冷ファンを動かした。本プロトタイプの位置情報取得には 3.4 節で提案した手法に基づき、解像度が VGA のカメラを 2 台用いた。計算機は表 2 のような環境を用いた。特に Intel C/C++ Compiler 8.0 を用いてカメラによる位置計測のためのコードを最適化している。結果、VGA カメラ 2 台を用いた 256 点位置計測のリフレッシュレートは 13Hz、約 0.5mm の位置分解能を実現した。既に示している図 3 がこのプロトタイプでハートの形状を呈示した例である。ラインスキャン方式によって各ピンを駆動しており、結果一つの形状を呈示するまでに約 10~20sec の時間が必要であった。

4.3 プロトタイプ 3 : 16 × 16 ピンマトリクス

プロトタイプ 2 では、一つの形状呈示に十数秒の時間がかかることがわかった。これがディスプレイの時間応答特性に起因するものなのか、制御に起因するものであるのかを評価するために C-SMA の冷却手段を油冷に置き換えて実験を行った。油は冷却装置（ペルチェ素子、300W）によって常時急冷されており、かつ油温が均一になるよう実験中は油を一定時間おきに攪拌した。バックライトを使用した 16 × 16 のピンマトリクスで構成したプロトタイプを実験機として用い、その最大ストロークは 30mm とした。本プロトタイプでは、奥行き方向の制御は On/Off しか行わずに、1 秒あたり最大何文字の呈示が可能であるか評価した。その結果、0.5~1fps で文字形状呈示が可能であることを確認した。図 13 に、アルファベットの”U”の形状が高速なラインスキャン方式で上から下に向かって呈示した様子を示す。

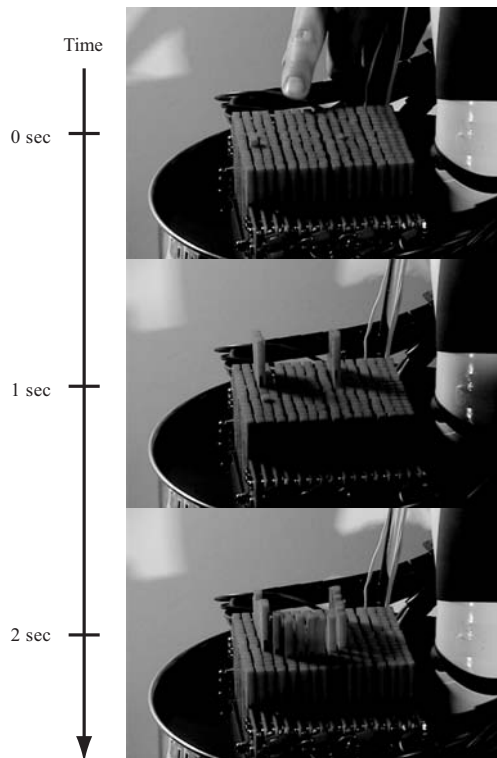


図 13 油冷した 16 × 16 ピンマトリクスによる高速な形状呈示の様子 (アルファベットの”U”の形状を呈示)

16 × 16 pin-rod matrix with improved system response using cooling oil. The character ”U” is presented in a top-to-bottom scanning sequence.

5. 考察

5.1 試作後のシステム評価

製作したプロトタイプは、それぞれ任意の形状を呈示することに成功した。リニアエンコーダおよびカメラを位置計測に用いたが、両者ともに 2.1 節で述べた高さ分解能 0.6mm よりも細かい位置計測が可能であった。一方で、マトリクス駆動回路による C-SMA の制御を実現したが、プロトタイプ 2 では形状遷移状態から形状保持状態に至るまで、10sec 以上を要した。フィードフォワード制御を適用したプロトタイプ 3 では、高速にディスプレイを駆動できたことから、ディスプレイ部の時間応答性ではなく、制御アルゴリズムがボトルネックとなっていることが予想される。この点は、準静的形状呈示に関しては問題ないが、今後は形状遷移状態に要する時間を短縮するアルゴリズムの検討が必要である。

第 2.1 節で議論した仕様と、製作したプロトタイプの仕様の比較を表 3 に示す。構成するピンロッドの本数以外の点においては、要求仕様をクリアするプロトタイプを製作することができた。焦点は構成するピンロッド数の拡張であるが、形状遷移状態に要する時間を問題としなければ、本稿の提案手法で拡張可能であると考えている。今後はディスプレイを構成するピンロッド数を増やし、実際に顔形状を呈示することで今回論じた点の更なる検証が必要である。

表 3 人間の顔形状を目標とした場合のシステム仕様と製作したプロトタイプの様との比較.

Comparison of system requirements for presenting 3D human face and developed prototype.

	必要条件	実現した性能
高さ方向の分解能	0.6mm	0.1(プロトタイプ1) ~0.5mm(プロトタイプ2)
高さ方向のダイナミックレンジ	50 段階以上	60 段階以上
作動ストローク長	30mm 以上	30mm
構成するピンロッドの本数	45 × 45	16 × 16

5.2 拡張性の検討

駆動手法やピンロッド形状の工夫によってディスプレイ面を構成する画素を原理上いくらでも増やすことができることを3章で示した。しかしながら、C-SMAは熱によって駆動されるため、あまりに数を増やしてしまうと、C-SMAが生成する熱量が冷却によって取り去ることのできる熱量を越え、ディスプレイ全体が意図しない挙動を示す事態が想定される。

この問題も、呈示形状遷移状態に必要な時間を最適化する制御アルゴリズムによって解消されると我々は考えている。一つの形状を呈示するために必要な熱量は、それぞれの形状によって決定されるが、長い時間をかけて呈示する際には、既に与えた熱量が冷却等によって奪われてしまい、その分は再び加えなくてはならない。形状呈示遷移時に要する時間が最適化できれば、C-SMAへ無駄に与えるエネルギーを熱量を減らすことで、結果ディスプレイ誤動作も回避できると考えている。この最適化問題について、我々は同時に駆動するピンロッドの数を可能な限り増やして、目標となる図形の呈示までにかかる時間を最小化する制御アルゴリズムを線形計画法を適用することを検討している²⁰⁾。この最適化問題については以後の論文において詳述することとして、本稿では割愛する。

5.3 インタラクティブディスプレイとしての検討

今回提案した3次元形状ディスプレイは物理形状を再現していることから、視覚情報の出力のみならず、直接形状に触れて変形入力することも可能と考えられる。本ディスプレイを製作過程において、今回用いたC-SMAは力を加えることで駆動中でも容易に変形(伸張)することが明らかとなった。この特性を生かし、形状保持状態時にピンロッド引き上げ・押し下げることによって変形入力を記録・再生可能であるシステム(たとえば、情報空間内で製作した3Dモデルを呈示し、その一部を素手で修正し、即座に情報空間に反映させるなど)を構築できると考えている。実際にプロトタイプ2では記録・再生機能を実装しており、外力によって生じたピンロッドの挙動を取り込み情報空間内のCGに反映させるアプリケーションを試作しており(その様子は<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/projects/popup/>より閲覧可能)、今後はどの程度まで力をかけることが可能なのかC-SMAの耐久性について検討が必要である。

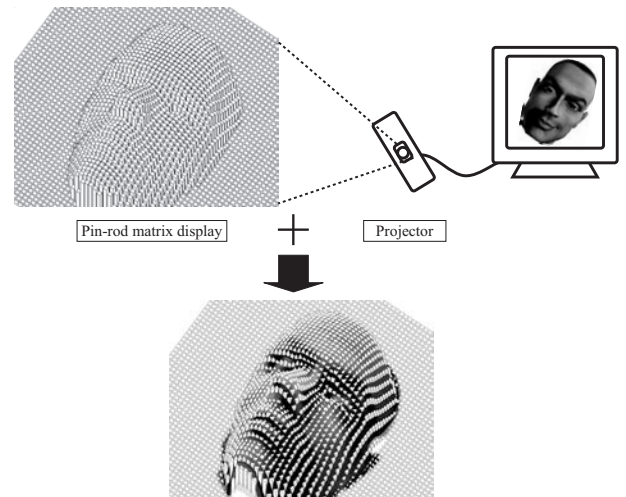


図 14 色表示を加えた3次元形状ディスプレイ
Concept of 3D form display with color representation.

6. おわりに

本稿で、我々は多数のピンマトリクスによって構成される、3次元形状ディスプレイの満たすべき要件について考察し、コイル形状記憶合金を用いて実現できることを示した。製作した三つのプロトタイプは、呈示形状を任意に変化可能であり、最大ストロークは30mm、奥行き方向に0.1~0.5mmの分解能で制御できることを確認した。カメラを用いた位置計測手法の有効性を実装を通して確認し、また液冷によってディスプレイが最大0.5-1fpsで動作することを確認した。

今後はディスプレイを構成するピンロッド数を増やし、かつ現在よりも高密度配置を実現した製作が望まれる。また、ピンロッドに光ファイバ等の導光路を利用して、ピンマトリクス下部より静止画・動画をプロジェクタで投影することで情報呈示能力を拡張することができるだろう(図14)。

また、実際に物体形状を再現する本ディスプレイの利点を生かして、形状の呈示のみならず変形入力をも受け入れるインタラクティブディスプレイを実現することも可能である。彫刻や粘土細工を製作するような感覚で、情報空間内の3Dモデルを本ディスプレイで呈示した上で、素手で形状を変形させる応用が考えられる。これは、PHANToM²¹⁾などのインターフェイスでは成しえなかった素手による直感的な情報入力を可能とし、情報空間内の作業をよりスムーズなものに変えることができると考えている。

【文 献】

- 1) 池内, 倉川, 西野, 佐川, 大石, 高瀬: "The Great Buddha Project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-", 日本バーチャルリアリティ学論, **7**, 1, pp. 103-113 (Mar. 2002)
- 2) 生命工学工業技術研究所編: "設計のための人体寸法データ集", 東京, 日本出版サービス (1996)
- 3) 増田千尋: "3次元ディスプレイ", 東京, 産業図書 (1992)
- 4) 大山, 今井, 和気共編: "新編 感覚・知覚ハンドブック", 東京, 誠信書房 (1994)
- 5) 佐藤監修, 勝浦, 佐藤, 枡原, 横山共編: "人間工学基準数値数式便覧", 東京, 技報堂出版株式会社 (1992)

- 6) 映像情報メディア学会編: "電子情報ディスプレイハンドブック", 東京, 培風館 (2001)
- 7) J. C. Bliss, M. Katcher, C. H. Rogers and R. P. Shepard: "Optical-to-Tactile Image Conversion for the Blind", IEEE Transactions on Man-Machine Systems, **MMS-11**, 1, pp. 58-65 (Mar. 1970)
- 8) I. R. Summers, C. M. Chanter: "A Broadband Tactile Array on the Fingertip", J. Acoustical Society of America, **112**, pp. 2118-26 (Nov. 2002)
- 9) ケーゲーエス株式会社, <http://www.kgs-jpn.co.jp/> (2004年11月1日現在)
- 10) M. Shinohara, Y. Shimizu, A. Mochizuki: "Three-Dimensional Tactile Display for the Blind", IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, **6**, 3, pp. 249-256 (Sep. 1998)
- 11) D. T. V. Pawluk, C. P. van Buskirk, J. H. Killebrew, S. S. Hsiao, K. O. Johnson: "Control and Pattern Specification for High Density Tactile Display", in Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, **DSC. 64**, pp 97-102 (Nov. 1998)
- 12) C. R. Wagner, S. J. Lederman, R. D. Howe: "A Tactile Shape Display Using RC Servomotors", In Proc. of the 10th Symp. On Haptic Interface For Virtual Envir. & Teleoperator Sys., pp. 354-355 (Mar. 2002)
- 13) GLOWBITS, <http://www.glowbits.com/> (2004年11月1日現在)
- 14) D. A. Kontarinis, J. S. Son, W. Peine, R. D. Howe: "A Tactile Shape Sensing and Display System for Teleoperated Manipulation", in Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 641-646 (Apr. 1995)
- 15) P. S. Wellman, W. J. Peine, G. Favalora, and R. D. Howe: "Mechanical Design and Control of a High-Bandwidth Shape Memory Alloy Tactile Display", In Proc. of the Int. Symp. of Experimental Robotics, pp. 56-66 (June 1997)
- 16) P. M. Taylor, a. Moser, A. Creed: "A sixty-four element tactile display using shape memory alloy wires", Displays, pp. 163-168 (May 1998)
- 17) K. Ikuta, M. Tsukamoto, and S. Hirose: "Shape Memory Alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for an endoscope", in Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp. 427-430 (Apr. 1988)
- 18) 仲谷, 内田, 山本, 梶本, 川上, 館: "形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの研究", 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp. 247-248 (Sep. 2003)
- 19) M. Nakatani, H. Kajimoto, D. Sekiguchi, N. Kawakami, and S. Tachi: "3D Form Display with Shape Memory Alloy", in Proc. of 13th International Conference on Artificial reality and Telexistence (ICAT), pp. 179-184 (Dec. 2003)
- 20) 仲谷, 梶本, 関口, 川上, 館: "形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの制御手法", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会, 講演会 CD-ROM 1A1-H-9 (Jun. 2004)

21) SensAble Technologies, Inc., <http://www.sensable.com/> (2004年11月1日現在)



なかつたに まさし
仲谷 正史 2003年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2005年, 同大学院修士課程修了。同年より同大学院博士課程に在籍, 日本学術振興会特別研究員 (DC1), Harvard University, Division of Engineering and Applied Sciences Research Assistant. 触覚メカニクス・触覚ディスプレイの研究に従事。



かじもと ひろゆき
梶本 裕之 1998年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2001年, 同大学院修士課程修了。2003年より, 同大学院情報理工学系研究科助手。博士 (情報理工学)。触覚ディスプレイ, 人工現実感システムなどの研究に従事。



Kevin Vlack 2000年, University of Illinois at Urbana-Champaign, Computer Science in College of Engineering 卒。2003年より, 東京大学大学院情報学環・学際情報学府修士課程に在籍。信号処理, コンピュータグラフィックス, バーチャルリアリティの研究に従事。



せきぐち だいろく
関口 大陸 1996年, 東京工業大学大学院理工学研究科修了。同年, (株)東芝に入社。2001年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年より科学技術振興事業団研究員。2002年より, 東京大学大学院情報理工学系研究科助手。博士 (工学)。ネットワークロボティクスおよびバーチャルリアリティに関する研究に従事。



かわかみ なおき
川上 直樹 1996年, 東京工業大学大学院理工学研究科修了。1999年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年, 同大学院工学系研究科助手。2002年より, 同大学院講師。博士 (工学)。バーチャルリアリティの研究に従事。



たち すずむ
館 暲 1973年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年, 同大助手。1975年より通産省工技院機械技研を経て, 1989年, 東京大学先端科学技術研究センター助教授。1992年, 同教授。1994年, 同大学院工学系研究科教授。2001年より, 同大学院情報理工学系研究科教授。博士 (工学)。信号処理, 盲導犬ロボット, テレグジスタンスなどの研究に従事。