



# Pin Ball: ハンドヘルド型球体ピンアレイインターフェース

## Pin Ball: A Handheld Spherical Pin Array Interface

杉本隆平<sup>1)</sup>, 梶本裕之<sup>2)</sup>

Ryuhei SUGIMOTO and Hiroyuki Kajimoto

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, s2210337@gl.cc.uec.ac.jp)
- 2) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, kajimoto@kaji-lab.jp)

**概要**: 球面上に配置された直動アクチュエーターによって構成されるピンアレイによって, 立体的な触覚提示を可能にする Pin Ball を提案する. 提案するデバイスは 80 本のピンアレイによって構成され, 小型に設計された球型 A-TUI である. 全周囲に配置されたピンアレイが伸縮し, ユーザーの両手に立体的な形状や触覚を提示することができる. 本稿では, 球型 A-TUI を構成する回路基板やアクチュエーターに関する検討を示す.

**キーワード**: Actuated Tangible Interfaces, Shape-changing User Interfaces

### 1. はじめに

ハンドヘルドデバイスは我々の生活の中で重要な役割を果たしている. 例えばスマートフォンやタブレット, ゲームパッドなどのデバイスは情報の取得やコミュニケーションの手段, ゲームの操作入力として日常的に使用されている. これらのハンドヘルド型デバイスの多くは現在, バイブレーションなどの触覚提示機能を有しており, 提示されている視覚情報の補強, 入力の確認, アラート等の機能が利用されている.

ハンドヘルド型デバイスのための触覚提示手法はこれまで数多く研究されている. 代表的なものはバイブレーションによる振動触覚提示, 静電気力を用いた摩擦変調提示, 電気刺激を用いた神経刺激, 温度提示, ピンアレイを用いた形状提示などである. これらの多くは触覚の中でも「表面の性質」を提示するものである. 一方で「立体的な形」をハンドヘルドデバイスとして実装する手法は比較的少ない. 例えば摩擦変調提示によってもある程度の凹凸感を知覚させられることは知られているが, 大きな形の変化を知覚させるものではない. ピンアレイは立体的な形状を提示可能と考えられるが, 多くの場合は点図ディスプレイのように微小なストロークの変化を生じさせるものであり, 高精度な位置姿勢検出 (モーションキャプチャ) と合わせて, 手に持ったデバイスを空間的に大きく動かすことでようやく立体的な形を把握できるものであった. 本研究は形状提示可能なこのハンドヘルド型のピンアレイディスプレイを開発するものである.

形状を提示するピンアレイディスプレイを構成するには, 縦横に  $n$  個のピンを配置するとすれば  $n^2$  個のピンが必要となる. これまで多くのピンアレイインターフェース

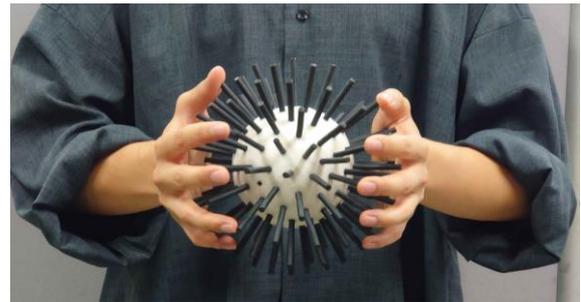


図 1 球体の土台にピンアレイが配置されている様子 (模型)

が開発されており[1][2][3], その多くは大きな土台に固定された形態を取る. しかしこうした大型で固定されたピンアレイインターフェースは, その装置の大きさからハンドヘルドデバイスやウェアラブルデバイスとして使用することが困難であるという課題がある.

一方でこれまで, ソレノイドリニアアクチュエーター (SLA) を使用したハンドヘルド型のピンアレイインターフェースがいくつか提案されている[4][5]. 円筒形状の側面に SLA を搭載し 360 度方向を 8 等分した 8 方向に方向提示をするデバイスや, 球体の全面に SLA を搭載し, 全周囲に方向提示するデバイスなどがその代表例である. しかし, SLA はオンかオフの 2 つの状態しか取ることができず, 多方向への方向提示はすることができても, 形状を提示することはできなかった. このように形状を提示可能な直動アクチュエーターではなく SLA が多く用いられてきた背景には機構上の問題が存在する. それは, 形状変化ディスプレイの各ピンを動作させるために必要なアクチュエーター機構やバッテリー, 制御部などの大きな機構が下部形状を再現するために必要な立体的なピンの配置の

障害となるからである。

そこで我々は、長さを調整することができる小型の直動アクチュエーターを球体の全面に配置するピンアレイインターフェースを設計した。図1に球体の土台にピンアレイが配置されている様子を示す。このように直動アクチュエーターを配置することにより、ユーザーの両手全体に全周囲への方向提示と形状変化を用いた触覚提示をすることが可能になる。本稿では、球体型のピンアレイインターフェースを構成する回路基板やアクチュエーターに関する選定、アプリケーションシナリオについての検討を述べる。

## 2. 関連研究

長さを調整可能な直動アクチュエーターを用いたピンアレイディスプレイの多くは HCI (Human-Computer Interaction) 研究で提案されている。InFORM[1]やそれに関連する共同研究[2][3]ではピンアレイを大きな装置台の上に固定し、その上に映し出される有形物を手で直感的に操作するタンジブルユーザーインターフェース(TUI)としての利用が検討されてきた。

ピンアレイを固定された装置としてではなくハンドヘルド型デバイスとしての活用を試みた研究もある。Benkoら[6]はハンドヘルド型デバイスに小型のピンアレイを搭載し、VR空間に存在する物体を人差し指の指腹部分に触覚提示している。また、人差し指の指腹にのみ装置を装着し利用するウェアラブルなピンアレイも研究されている。これらのピンアレイは全て平面上に配置されているが、動作方向を複数持ち、方向提示が可能な例も存在する。

非平面的なピンアレイの配置は様々な形態が検討されてきた。Yoshidaら[8]は四角柱形状の横2面に直動アクチュエーターを搭載し、そのデバイスを掴んだ際に手の2箇所形状変化触覚提示可能な手法を提案している。Ujitokora[9]は高密度のピンを人差し指の指腹全体に覆うように巻きつけることで、より高密度な触覚提示を行っている。

ピンアレイのアクチュエーターとして SLA を用いた例として、HapiVec[4]や HedgeHog[5]などが存在する。HapiVecでは円筒形状の側面全体に SLA を配置し、VR空間における方向提示を行うことで動作補助の役割を担っている。HedgeHogでは球面全体に SLA を配置することで、より立体的な方向提示を可能にしている。

第1章に述べたとおり、ピンアレイインターフェースに SLA が多く用いられる理由には、ピンアレイを小型化することが困難であるという背景がある。ピンアレイを小型化するために様々な手法が研究されている。アクチュエーターに材料の特性を用いた例としてニクロム線の熱膨張を用いた手法[10]、形状記憶合金をアクチュエーターとして利用する手法[11][16]などが提案されている。しかし、これらの手法はアクチュエーターのストロークが短いことや、排熱の問題などを抱えている。

ロボティクス分野では、全周囲に直動アクチュエータ

ーを搭載したロボットの研究事例が存在する。Nozakiら[12]は直動アクチュエーター32本を筐体の全周囲に搭載することで、回転しながら移動可能な球体ロボットを提案している。形状変化できるというピンアレイの特性を活用することで、地面との接地面積を増やし、他の形状変化ロボットに比べて安定した移動が可能となる。

## 3. システム構成

形状変化を提示することのできるピンアレイインターフェースをハンドヘルドデバイスとして設計するためには、手でもつことのできる大きさの球体内に必要な機構をすべて搭載しなければならない。本デバイスの土台部分には図2左に示すジオデシックドームと呼ばれる80面体を使用し、それらの各面から垂直方向に向けて80本のピンを搭載する。

各ピンには小型の直動アクチュエーターが必要である。今回使用するピン(メーカー:GoMotorWorld 型番:LA-T8 linear actuator)は全長75.5mmであり、21mmの可動域を有している(図3)。次に、これらのピンアレイを制御する内部構造には、バッテリー、マイコン、制御基板を搭載する。

直動アクチュエーターは動作時に1本あたり動作時には電圧が5V、電流を100mA必要とするため、80本のピン全てが同時に動作した場合は最大8Aの電流が必要となる。そのためバッテリーには電圧4V、最大9Aの電流を流すことのできる、容量350mAhのリチウムポリマーバッテリーを使用した。

また、制御基板はメイン基板とサブ基板の2種類に役割を分けて設計した。メイン制御基板には無線機能のついたマイコン(ESP32-WROOM-32)を搭載し、サブ基板を垂直にジョイントできるようにピンソケットを配置した。サブ基板は1チップで16個のPWM信号を発信できるIC(メーカー:NXP USA Inc IC:PCA9685)を2つと、1チップで2つのモーターを駆動できるモータードライバ(メーカー:Texas Instruments IC:DRV8835DSSR)を8つ搭載した。

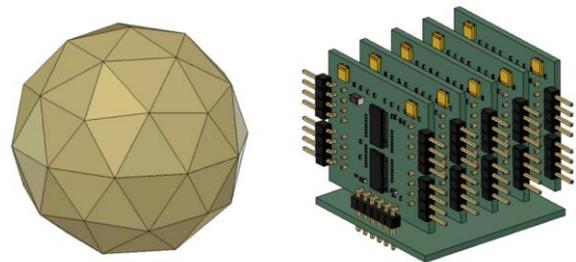


図2 左: ジオデシックドーム 右: メイン基板とサブ基板



図3 使用するアクチュエーター(左:収縮時 右:伸長時)

このサブ基板を合計で5枚用意し、1つのメイン基板に

ジョイントする。これらの2種類の基板は図のようにI2C通信で接続されており、各サブ基板はバス上に並んでスレーブとなっている。メイン基板とサブ基板をアッセンブルした立体図を図2右に示す。

## 4. アプリケーションシナリオ

### 4.1 立体触覚体験

音響体験の没入感を高める方法として、バイノーラル音源を用いた立体音響がある。立体音響を用いることで、ユーザーは視界を制限されることなく3次元空間内の周辺情報を知覚することができる。本デバイスはこの立体音響に代わる体験として立体触覚体験を提案する。例えばユーザーはHMD(ヘッドマウントディスプレイ)を装着し、球体ピンアレイを図1のように両手でホールドする。後ろから音が聞こえれば本デバイスの後方部分が波打つことで形状を変化させ、ユーザーに対し音源方向を提示する。また、図4の様に本デバイスを持ち変えることで、全周囲方向の触覚提示を知覚することができる。音以外にもユーザーの足の運動と筐体下部の形状を連動させて動かすことで、ユーザーの運動感覚も同時に知覚することができる。このように球体ピンアレイインターフェースを使うことで、視界を遮ることなく触覚情報のみで周辺環境情報や運動感覚を伝達することが可能になる。

立体音響と球体の触覚提示を組み合わせた先行事例としてatmoSphereがある[14]。提案装置は立体形状が提示できる特徴を生かすことで、全周囲を8分割した方向に触覚提示することを可能にしている。この時、全周囲への触覚提示と立体音響を組み合わせることで、クロスモーダルな音響体験を提案している。



図4 様々な筐体の持ち方

### 4.2 両手全体への生物的な鼓動提示

Hashimotoら[13]は2つのスピーカーをアクチュエーターとし、両手に心臓の鼓動感を提示する手法を提案した。また鼓動の遠隔伝送の試みも行われている[15]。これらの手法は低周波の振動を利用して触覚提示するものであるが、本デバイスはユーザーが両手または膝の上に載せた状態で筐体を持っている際に、球体ピンアレイ全体を脈拍するように制御することで形状変化を伴いながら生物的な鼓動を提示できると考えられる。

### 4.3 自走するピンアレイボール

近年の研究では全周囲に直動アクチュエーターを搭載した形状変化ロボットが提案されている[12]。本デバイスは同様の機構を有しているため、直動アクチュエーターを制御することにより自走することが可能であると考えられる。例えばユーザーがGUIのユーザーインターフェース

として本デバイスを利用したケースを考える。ユーザーはピンの押し込みによって操作を行い、またその際ユーザーの注意は画面内に向いている。次にピンアレイ全体が乱雑に動作することで本デバイスはユーザーの手の内から離れ、床面を転がっていく。この時ユーザーの注意は画面内から画面外へと切り替わる。その後は転がるピンアレイが自発的に手元に戻ってきたり、能動的にユーザーがインターフェースを回収しに動くような動作へと移行する。このようにピンアレイインターフェースが現実世界へと注意を引くことにより、アプリケーションの枠組みを現実空間に拡張することが可能になる。

## 5. おわりに

本研究は形状提示可能なピンアレイインターフェースを球状のハンドヘルド型デバイスとして設計することを目標とした。回路基板、バッテリーや制御部など全体の設計を小型にすることで、ユーザーの両手に立体的な形状を提示できるTUIを提案した。

今後は本デバイスを用いて利用可能なアプリケーションの開発や、形状提示の精度の向上およびユーザーの主観評価実験を検討していく。

## 参考文献

- [1] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii. 2013. InFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13).
- [2] K. Nakagaki, L. Vink, J. Counts, D. Windham, D. Leithinger, S. Follmer, and H. Ishii. 2016. Materiable: Rendering Dynamic Material Properties in Response to Direct Physical Touch with Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16). New York, NY, USA, 2764–2772.
- [3] D. Leithinger, S. Follmer, A. Olwal, S. Luescher, A. Hogge, J. Lee, and H. Ishii. 2013. Sublimate: state-changing virtual and physical rendering to augment interaction with shape displays. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13). New York, NY, USA, 1441–1450.
- [4] D. K.Y. Chen, J.-B. Chossat, and P. B. Shull. 2019. HaptiVec: Presenting Haptic Feedback Vectors in Handheld Controllers using Embedded Tactile Pin Arrays. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19). New York, NY, USA, Paper 171, 1–11.
- [5] A. Abler, J. Zárate, T. Langerak, V. Vechev, and O. Hilliges, "Hedgehog: Handheld Spherical Pin Array based on a Central Electromagnetic Actuator," 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), Montreal, QC, Canada, 2021,

- pp. 133-138, doi: 10.1109/WHC49131.2021.9517197.
- [6] H. Benko, C. Holz, M. Sinclair, and E. Ofek. 2016. NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16). , New York, NY, USA, 717-728.
- [7] H. V. Ramaswamy, M. Agarwal: Machine Learning for Signal Processing, IEEE Signal Processing Magazine, vol.~39, no.~1, pp.~72--79, 2022.
- [8] S. Yoshida, Y. Sun, and H. Kuzuoka. 2020. PoCoPo: Handheld Pin-based Shape Display for Haptic Rendering in Virtual Reality. In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20). , New York, NY, USA, 1-13.
- [9] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, and K. Hirota: Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display, in IEEE Access, vol. 8, pp. 145107-145114, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015058.
- [10] H. Kajimoto and L. A. Jones, "Wearable Tactile Display Based on Thermal Expansion of Nichrome Wire," in IEEE Transactions on Haptics, vol. 12, no. 3, pp. 257-268, 1 July-Sept. 2019, doi: 10.1109/TOH.2019.2912960.
- [11] Y. Baba, H. Igarashi, R. Liu, and H. Sawada: A Pin-Array Tactile Display Using Shape-Memory Alloy Wires for the Presentation of Various Tactile Sensation, International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 20, Number 3, June 2024, pp. 653-664.
- [12] H. Nozaki, Y. Kujirai, R. Niiyama, Y. Kawahara, T. Yonezawa, and J. Nakazawa, "Continuous Shape Changing Locomotion of 32-legged Spherical Robot," 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018, pp. 2721-2726, doi: 10.1109/IROS.2018.8593791.
- [13] Y. Hashimoto and H. Kajimoto. 2008. Emotional touch: a novel interface to display "emotional" tactile information to a palm. In ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos (SIGGRAPH '08). , New York, NY, USA, Article 15, 1.
- [14] H. Fushimi, D. Kato, Y. Kamiyama, K. Yanagihara, K. Minamizawa, and K. Kunze. 2017. AtmoSphere: designing cross-modal music experiences using spatial audio with haptic feedback. In ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies (SIGGRAPH '17). , New York, NY, USA, Article 4, 1-2.
- [15] 渡邊 淳 司, 川 口 ゆ い, 坂 倉 杏 介, 安 藤 英 由 樹, “心臓ピクニック”: 鼓動に触れるワークショップ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol16 No.3 pp.303-306, 2011.
- [16] I. Poupyrev, T. Nashida, S. Maruyama, J. Rekimoto, and Y. Yamaji. 2004. Lumen: interactive visual and shape display for calm computing. In ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies (SIGGRAPH '04). , New York, NY, USA, 17.