

結露を用いたディスプレイの結露生成機構に関する検討

辻本祐輝^{†1} 伊藤雄一^{†1} 尾上孝雄^{†1}

本稿では、結露を用いて情報を提示するディスプレイを提案し、そのための結露生成機構について検討する。窓やコップに自然に発生した結露に指で触れて描画する行為は誰もが経験したことのある行為であり、結露を用いて情報を提示することによって、誰でも直感的に情報と触れ合うことが可能となる。また、光学的なディスプレイでは得られない、実際に情報に触れているという感覚を得ることができる。本システムでは、ペルチェ素子等を用いてディスプレイ面の任意の位置の冷却を制御することによって結露の発生・消滅を制御する。これにより、結露を用いて情報を提示することが可能となる。

A Study on Condensation Generation Mechanism for Display with Water Condensation

YUKI TSUJIMOTO^{†1} YUICHI ITOH^{†1}
TAKAO ONOYE^{†1}

In this paper, we propose a display with water condensation and a condensation generation mechanism for the display. Water condensation is a natural canvas found on a car window or a glass on which we often scribble figures, illustrations, and messages. Our proposed display enables users to write or apply graffiti with their fingers on a pattern of computer generated water condensation. The system basically consists of peltier devices, an array of heat conductive actuators, and a display surface.

1. はじめに

近年、マルチタッチインタラクションと平面ディスプレイを組み合わせたサーフェスインタフェースに関する研究が盛んに行われている。情報提示面に高解像度ディスプレイを用いたものや、スマートフォンやタブレット端末を用いたシステムなども多く提案されている。しかし、それらはディスプレイ表面がガラス平面であるものがほとんどであり、人と情報のインタラクションはガラス面によって隔絶されているため、情報に直接触れている感覚を得るのは難しい。これに対し、ディスプレイ表面の形状を制御することや身近な実物体をディスプレイに用いることによって、情報を視覚的に表示するだけでなく、質感や凹凸を加えて直感的な理解を促すような研究がなされるようになってきた。これらのディスプレイにより、人が日常において人や物とインタラクションする際に用いる慣れ親しんだ方法で情報と直感的にインタラクションすることができる。

そこで本研究では、サーフェスインタフェースの新たな情報提示手法として結露に着目し、結露を用いたディスプレイと、そのための結露生成機構を提案する。自動車の窓やコップの表面に自然に発生した結露に指で触れて描画する行為は子供から大人まで広く行われており、結露を用いた芸術作品も存在することから、結露は我々にとって最も身近なキャンバスの1つであると言える。結露による情報の提示によって、人は何らかの指示がなくても自然に情報とインタラクションすることが可能である。例えば、指で触れて情報を消したり、息を吹きかけて再び発

生させたりすることができる。

2. 関連研究

2.1 表面の形状を変化させるディスプレイ

ディスプレイ表面の形状を変化させることにより、平面的なディスプレイでは直感的に与えることのできない三次元情報の提示を行い、直感的なインタラクションを可能にするディスプレイに関する研究が発展している。Iwataらは、テーブルトップ型スクリーンの凹凸を制御することによって三次元形状を提示するディスプレイ“FEELEX”を提案している[1]。これは、リニアアクチュエータアレイの先端にゴム製のスクリーンを実装したものであり、触覚的な情報と視覚的な情報を組み合わせたインタラクションスタイルを提案したものである。Follmerらは、ユーザのジェスチャに応じてリアルタイムに三次元形状を提示するシステム“inFORM”を提案している[2]。このシステムは、アクチュエータアレイとプロジェクタを用いて三次元形状を提示するだけでなく、Kinectを用いることによるユーザのジェスチャに応じた提示情報の変化や、表面形状の制御により実物体を移動させるなどのインタラクションを可能にしている。

2.2 実物体を用いたディスプレイ

我々の身近に存在する実物体を用いることによって直感的なインタラクションを可能にするディスプレイに関する研究が発展している。Ochiaiらの提案する“A Colloidal Display”は細かく振動させたシャボン膜をスクリーンとして用いたディスプレイである[3]。指で触れることのできる3Dディスプレイなどへの応用が期待される。Hirayamaらは、シャボン玉そのものをピクセルとして用いたディス

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

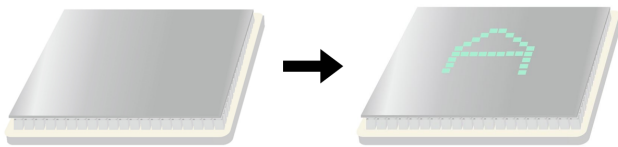


図 1 結露を用いたディスプレイ

Figure 1 A display with water condensation.

レイ“Shaboned Display”を提案している[4]。シャボン液が貯められた噴出口とエアポンプをアレイ状に配置し、各シャボン膜の大きさを自在に制御することにより視覚的なイメージを生成することができる。Parkesらは、水分を含ませたフェルトをペルチェ素子によって加熱し、発生した水蒸気がガラス面に付着して水滴となりピクセルを表現するディスプレイ“Dewy”を提案している[5]。このディスプレイでも水滴を用いているが、ユーザは水滴に触れることができず、指で描画するなどのインタラクションは不可能である。

これらは我々にとって身近な存在である物体を用いたディスプレイではあるが、シャボン玉を用いて絵を描くなどの行為を普段我々が行うことはなく、身近な表現方法であるとは言えない。我々が普段実物体に対して行う身近な表現方法で情報を表現してインタラクションすることができれば、より直感的で誰しもが容易に扱えるディスプレイを実現することができると思われる。

自動車の窓やコップの表面に自然に発生した結露に指で絵を描く行為は子供から大人まで広く行われており、結露を用いて何かを表現するという事は我々に身近なものであると言える。本研究では、結露を用いて情報を提示することにより、情報と直感的にインタラクションを行うことのできるディスプレイを提案する。

3. 結露を用いたディスプレイ

3.1 概要

本研究では、結露を用いて情報を提示するために、ディスプレイ面の任意の位置の結露の発生・消滅を制御することを目的とする。想定するディスプレイの概要を図1に示す。PCから信号を制御回路へ送って冷却装置を制御することにより、ディスプレイ上の任意の位置を冷却し、任意のパターンの結露の発生・消滅を制御するものである。本研究では、プロトタイプとして8×8ピクセルのディスプレイの実装を目指す。

次に、結露が発生する仕組みについて述べる。空気中の水蒸気が低温の物質によって冷却され、凝縮した水が物質の表面または内部に付着することにより結露が発生する。ある温度 $T[^\circ\text{C}]$ において、空気中の飽和水蒸気圧 $p(T)[\text{hPa}]$ は、Tetensの式により以下の式で近似的に表される[6]。

$$p(T) = 6.1078 \times 10^7 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (1)$$

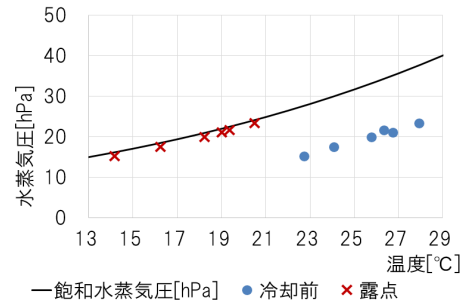


図 2 飽和水蒸気圧曲線と露点

Figure 2 Saturated vapor pressure curve and dew points.

式(1)を温度 T について解いたものが式(2)である。これらを用いることによって、ある室温・湿度下で物体を冷却したとき、物体表面に結露が発生し始める温度(露点)を求めることができる。

$$T = \frac{237.3 \times \log_{10} \frac{6.1078}{p(T)}}{\log_{10} \frac{p(T)}{6.1078} - 7.5} \quad (2)$$

3.2 冷却手法

結露の発生・消滅を制御するためにディスプレイの任意の位置を冷却するための手法について述べる。本研究では、ディスプレイを冷却するためにペルチェ素子を用いる。ペルチェ素子を用いて結露の発生・消滅を制御することが可能であることを確認するために、室温・湿度より求められる露点の理論値と、実際にディスプレイ上に結露が発生する温度を比較する予備実験を行った。実験内容について述べる。PVC (polyvinyl chloride) に鏡面加工を施した厚さ1.7mmの平板(以後PVCミラー)に、2×2個のペルチェ素子(75mm四方)を密着させ、電流を流して冷却し、結露が発生し始めるときのディスプレイ表面温度を測定した。これを室温と湿度が異なる6つの環境(24.1°C/58.6%, 25.8°C/60.0%, 26.7°C/60.0%, 22.7°C/55.2%, 26.3°C/63.0%, 27.9°C/62.0%)でそれぞれ5回行い平均値を求めた。ディスプレイ表面温度の測定には放射温度計DT8580(SainSonic社, 誤差: ±2°C)を、室温と湿度の測定には温湿度計AD-5682(エー・アンド・デイ社, 誤差: ±1°C, ±5%)を用いた。

実験結果を図2に示す。式(1), (2)により求められる露点の理論値を飽和水蒸気圧曲線によって示しており、各環境における冷却前の環境(温度, 水蒸気圧)と結露が発生し始めたときの環境(温度, 水蒸気圧)をプロットした。実験結果より、どの環境においても、測定値と理論値の差は放射温度計の誤差の範囲内であり、飽和水蒸気圧曲線に従って結露が発生したことが確認できた。したがって、結露を発生させるための冷却手法にペルチェ素子を用いることは有効であり、環境条件から得られる露点を用いることで結露の発生を制御できると言える。

次に、ペルチェ素子を用いてディスプレイの任意の位置を冷却する手法について述べる。ペルチェ素子を用いた冷却手法には主に2つの手法が考えられる。1つは図3(上)

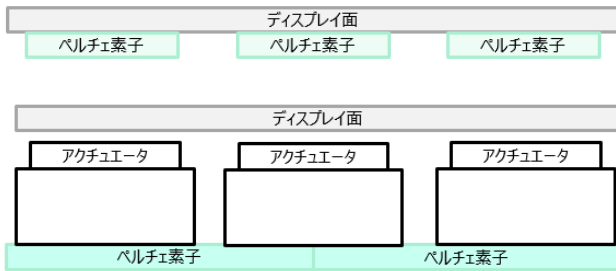


図3 冷却手法の概要

Figure 3 Overview of the cooling method.

に示す，ペルチェ素子をピクセル数と同じ数だけ配置する手法（以下ペルチェ方式）であり，もう1つは図3(下)に示す，ディスプレイ面とペルチェ素子の間に熱伝導アクチュエータをピクセル数と同じ数だけ配置する手法である（以下アクチュエータ方式）．ペルチェ方式では，冷却したい場所のペルチェ素子に電流を流すことによって冷却を開始し，電流を流すのをやめることによって冷却を終了する．アクチュエータ方式では，ペルチェ素子には常に電流を流した状態で，冷却したい場所のアクチュエータを駆動し，ディスプレイ面に接触させることによって冷却を開始し，アクチュエータを逆方向に駆動させてディスプレイ面から離すことによって冷却を終了する．

冷却開始の信号を送った時，ペルチェ方式では室温のペルチェ素子に電流を流して冷却を開始するのに対し，アクチュエータ方式では既に冷却されている熱伝導アクチュエータを接触させて冷却を開始するため，アクチュエータ方式の方がディスプレイを室温から露点まで冷却するのにかかる時間が短くなると考えられる．したがって，本研究ではアクチュエータ方式を用いてディスプレイを冷却し結露を発生させる．

3.3 ディスプレイ面の素材

提案システムで用いるディスプレイ面の素材を選定するために行った予備実験について述べる．我々は窓ガラスや鏡に発生した結露に触れることが多いことや，発生した結露の見えやすさを考慮し，透明または鏡面状の素材を用いる．また，アプリケーションでのピクセルの指定とディスプレイ面の結露の発生箇所がリアルタイムで一致していることが重要であるため，できるだけ結露の発生にかかる時間が短い素材を選定する．

実験に用いた素材は鏡(3mm)，PVC ミラー(3mm)，アクリル(3mm)，ガラス(10mm)，ステンレス(5mm, 3mm, 1mm)の7種類である．20mm×20mmのペルチェ素子 TEC1-03105（日本テクモ社）に3.7Vの電圧を印加し，2.0Aの電流を流して冷却した状態で，ディスプレイ素材を押し付けて冷却する．ディスプレイ素材をペルチェ素子に押し付けてからペルチェ素子と面積が等しい結露が発生するまでの時間を結露発生時間，その後ディスプレイ素材とペルチェ素子を離してから結露が完全に消えるまでの時間を結露消滅時

表1 ディスプレイ素材選定のための予備実験結果

Table 1 Results of material selection.

素材	鏡	PVC	アクリル	ガラス	ステンレス		
厚さ[mm]	3	3	3	10	5	3	1
発生時間[s]	17	15	26	45	6	6	3
消滅時間[s]	128	118	158	244	43	24	22

間として計測した．実験室内の環境は，室温 25.3℃，湿度 51%であった．

実験結果を表1に示す．これより，結露発生時間はステンレスを用いた場合が最も短いことがわかった．しかし，熱伝導アクチュエータをコイルと磁石を用いて実装することを考えると，磁石に引き寄せられるステンレスはディスプレイ素材には不適である．よって，ステンレスを除き結露発生時間が最も短い PVC ミラーをディスプレイ素材に用いる．リアルタイム性を考慮すると結露消滅時間も短いほうが好ましいが，ディスプレイ表面に温風を当てたり，より薄い PVC ミラーを用いるなどの方法を用いることにより結露消滅時間を短縮することは可能である．

また，結露発生時間をより短くするために，銅やアルミニウムなどの熱伝導率の良い素材についても同様の実験を実施したが，結露は発生しなかった．これは，素材の熱伝導率が高すぎてペルチェ素子から伝わる冷温が冷却箇所周辺に拡散してしまうためであると考えられる．

3.4 熱伝導アクチュエータを用いた制御手法の実装

熱伝導アクチュエータを用いて結露の発生・消滅を制御する手法の実装について述べる．熱伝導アクチュエータの概要を図4に示す．磁石を内蔵したアルミニウムブロックとコイルによりアクチュエータを実装し，これを64個作成した．これらを8×8のマトリクス状に，ペルチェ素子上に配置した．各アクチュエータ間には，互いの干渉を防ぐために磁気シールドを挿入した．実装した熱伝導アクチュエータアレイと実際に結露が発生している様子を図5に示す．

コイルに電流を流すことによりアクチュエータがディスプレイ方向に駆動して接触し，ディスプレイ面の冷却が開始され，ディスプレイ面の温度が露点に達するとディスプレイ面に結露が発生する．逆方向に電流を流すとアクチュエータが駆動してディスプレイ面から離れ，冷却が停止し温度が上昇していく．ディスプレイ表面の温度が露点より

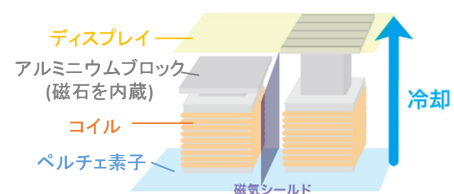


図4 熱伝導アクチュエータの概要

Figure 4 Overview of heat conductive actuator.

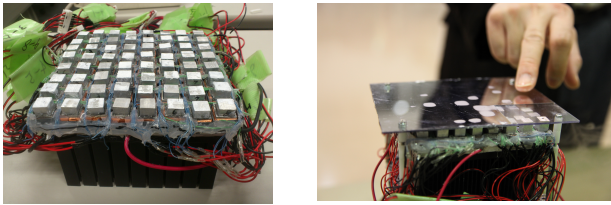


図5 熱伝導アクチュエータアレイの実装

Figure 5 Implementation of heat conductive actuators.

高くなると結露が消滅する。これを PC のアプリケーションで制御することにより、ディスプレイ面に任意のパターンの結露を発生させる。

4. 評価実験

4.1 実験目的・概要

結露を用いてリアルタイムに情報を提示することを考慮すると、ディスプレイの性能として、結露の発生と消滅にかかる時間が重要である。前章で実装したペルチェ素子と熱伝導アクチュエータアレイを用いた結露制御手法（アクチュエータ方式）と、ペルチェ素子のみを用いた結露制御手法（ペルチェ方式）について、結露の発生と消滅にかかる時間を比較する実験を行った。アクチュエータ方式では、すでに冷却されたアクチュエータ（8mm×8mm）を駆動させてディスプレイ表面温度を制御する。これに対しペルチェ方式では、室温のペルチェ素子（8.3mm×8.3mm）に電流を流すことによってディスプレイ表面温度を制御する。

4.2 実験環境

アクチュエータ方式では、プロトタイプである 2×2 熱伝導アクチュエータアレイを用いた。これは、40mm×40mm のペルチェ素子の上に、前章で実装した熱伝導アクチュエータを 2×2 で配置したものである。ペルチェ方式では、8.3mm×8.3mm のペルチェ素子を用いた。いずれの方式においても、8cm×13.5cm のヒートシンクと DC ファン（11.5V, 0.15A）を用いてペルチェ素子の発熱面を放熱した。ディスプレイ素材は、厚さ 0.5mm の PVC ミラーを用いた。実験室内の温度は 22.0℃、湿度は 38%であった。

4.3 実験手順

アクチュエータ方式では、ペルチェ素子に電流を流してアクチュエータを十分に冷却した後（7.26V, 1.50A）、アクチュエータを一つだけ上に駆動させ、ディスプレイ面の冷却を開始した。ディスプレイ面にアクチュエータ上面とほぼ同じ面積の結露の発生を確認した後、アクチュエータを下に駆動させて冷却を終了した。

ペルチェ方式では、ペルチェ素子とディスプレイ面に放熱用シリコンを塗布して密着させ、ペルチェ素子に電流を流すことにより冷却を開始した（2.80V, 1.00A）。ディスプレイ面にペルチェ素子上面とほぼ同じ面積の結露の発生を確認した後、ペルチェ素子に電流を流すのをやめて冷却を終了した。

各方式において、ディスプレイ面の冷却を開始してから

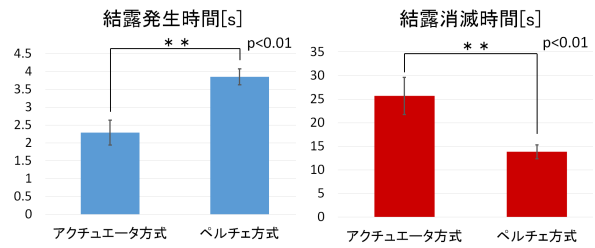


図6 評価実験結果

Figure 6 Results of evaluation experiment.

結露が発生するまでの時間と、冷却を終了してから結露が完全に消滅するまでの時間を測定した。これを各方式でそれぞれ 5 回実施した。

4.4 結果・考察

結露発生時間と結露消滅時間の測定結果を図 6 に示す。有意水準 1% で t 検定を行った結果、アクチュエータ方式の方が有意に短い時間で結露が発生することがわかった。ペルチェ方式ではディスプレイ面に密着させたペルチェ素子を常温から冷却していくのに対し、アクチュエータ方式ではすでに十分冷却されたアクチュエータをディスプレイ面に接触させて冷却していくためだと考えられる。

また、結露の消滅にかかる時間はペルチェ方式の方がアクチュエータ方式よりも有意に短くなった。冷却を終了した後、アクチュエータ方式では空気中とピクセル周辺部分からの熱の移動によってディスプレイ面の温度が上昇するが、ペルチェ方式ではペルチェ素子に電流を流すのをやめると、温度の上昇した放熱面の熱が吸熱面に伝わり、吸熱面からディスプレイ面に伝わる。このようにペルチェ方式では、接触しているペルチェ素子からの伝熱も影響するため、ディスプレイの温度上昇が速くなり、結露消滅時間が短くなったと考えられる。

ディスプレイとして用いることを考慮すると、PC アプリケーションでのピクセルの ON/OFF と実際に結露が発生している場所がリアルタイムで一致していることが重要である。そのため、結露発生時間と結露消滅時間はどちらも短い方が良いと考えられる。しかし、ディスプレイ面に温風を当てるなどの方法を用いれば結露の消滅にかかる時間を短縮させることは容易であるため、結露消滅時間よりも結露発生時間の方が重要である。したがって、結露発生時間がより短いアクチュエータ方式（提案手法）の方が、結露の制御手法として適していると言える。

5. 応用・今後の展望

結露を用いたディスプレイの応用として、住宅や飲食店などの建築物の窓や鏡に自由に結露を発生させることなどが考えられる。窓はあらゆる場所に存在し、窓をディスプレイとして用いることができれば、視界を遮らない自然でアンビエントなディスプレイの実現が可能である。現在の制御方法では視界を遮らずに窓に結露を発生させることは難しいため、制御方法を検討する必要がある。視界を遮ら

ない手法として、窓全体を冷却して結露を全面に発生させた状態で、ニクロム線や遠赤外線を用いて視界を遮らずに不必要な場所の結露を消滅させるなどの手法が考えられる。また、鏡は人が朝起床して最初に行う行為である洗顔に使用されるため、その日の予定や天気予報を鏡に提示することができれば、それらの情報を自然に、また確実に得ることができる。

今後の展望としては、上記の応用の実現に向けて、ピクセルの階調値を表現するために結露の濃淡を制御することや、ディスプレイの高解像度化、インタラクティブ性の向上などをを目指す。現在実装されている8×8ディスプレイでは、いくつかの文字や荒い図などしか表現できない。高解像度化のためには、アクチュエータの配置密度を大きくすることや電力面などについて検討することが必要である。また、現在はPCのアプリケーション画面で指定したパターンの結露をディスプレイに発生させるのみであるが、カメラと画像解析を用いてディスプレイ上で実際に結露が発生している場所を認識できれば、ユーザが結露に触れて情報を加工することが可能である。これにより、結露の保存・再生やアンドゥ・リドゥなどの、普段接する結露では不可能な操作も可能となる。

6. おわりに

本稿では、情報とのインタラクションを直感的に行うことを可能にするディスプレイとして、結露を用いたディスプレイとそのための結露生成機構を提案した。結露をディスプレイに用いることによって、人が普段結露に触れるときに用いる自然な方法で情報とインタラクションすることが可能である。予備実験により、ペルチェ素子を用いてディスプレイを冷却することにより結露の発生・消滅を制御することが可能であることと、結露の発生する鏡面状のディスプレイ面の素材として、鏡やステンレスなどよりもPVCミラーが適していることを確認した。ディスプレイ面の任意の位置に結露を発生させるために、ペルチェ素子と熱伝導アクチュエータを用いた制御手法を実装した。

評価実験では、提案手法であるペルチェ素子と熱伝導アクチュエータによる制御手法を用いた場合と、ペルチェ素子のみによる制御手法を用いた場合について、結露の発生にかかる時間と結露の消滅にかかる時間を比較した。実験の結果、提案システムの方が有意に短い時間で結露を発生させることが可能であり、結露を用いたディスプレイの制御手法として提案手法がより適していることが示唆された。

今後の課題として、より高解像度なディスプレイの実装や、カメラなどを用いることによるインタラクティブ性の向上、窓や鏡などの身近な場合への応用などを検討していきたい。

参考文献

- 1) Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura. Project FEELEX: adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '01)*. pp. 469-476, 2001.
- 2) Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 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)*. pp. 417-426, 2013.
- 3) Yoichi Ochiai, Alexis Oyama, and Keisuke Toyoshima. A colloidal display: membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies (SIGGRAPH '12)*. Article 2, 2012.
- 4) Shiho Hirayama and Yasuaki Kakehi. Shaboned display: an interactive substantial display using soap bubbles. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies (SIGGRAPH '10)*. Article 21, 2010.
- 5) Amanda Parkes and Dietmar Offenhuber. Dewy: a condensation display. In *ACM SIGGRAPH 2007 posters (SIGGRAPH '07)*. Article 44, 2007.
- 6) O. Tetens, "Über einige meteorologische begriffe," *Z. Geophys.*, vol.6, pp.297-309, 1930.