

結露を用いたインタラクティブディスプレイの濃淡制御手法

辻本祐輝^{†1} 伊藤雄一^{†1} 尾上孝雄^{†1}

概要: 本稿では、結露によりピクセルを構成し情報を提示するインタラクティブディスプレイ Ketsuro-Graffiti の濃淡制御手法について検討する。結露が発生する条件、濃淡を制御するための手法について検討し、マトリクス状に配置したペルチェ素子アレイの温度を PID 制御により個別に制御する結露生成機構を提案する。2×2 ピクセルのディスプレイを実装し、何段階の濃淡を制御できるか評価する被験者実験を行った。その結果、9 段階の濃淡に有意差がみられ、提案システムにより 9 段階の濃淡を制御できることがわかった。

A Study on the Method for Thickness Control of an Interactive Display with Water Condensation

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

Abstract: In this paper, we describe the method to control the thickness of water condensation which we utilize as a pixel of a novel interactive display named “Ketsuro-Graffiti”. We investigate the mechanism of water condensation and the method to control the thickness of water condensation. In addition, we implemented the prototype of Ketsuro-Graffiti using peltier devices and thermistors and evaluated the performance of thickness control. As a result, there were significant differences between nine thickness of water condensation. In other words, the result suggested that our proposed system can control nine thickness of water condensation.

1. はじめに

我々の身の回りには、液晶ディスプレイやスクリーンとプロジェクタによるシステムなど、情報提示のための様々なディスプレイが存在する。情報技術の発展に伴い、マルチタッチディスプレイを用いたスマートフォンなどのデバイスや、ヘッドマウントディスプレイを用いたシステムなども一般的なものとなりつつある。これらにより、より直感的な方法での情報とのインタラクションが可能となっている。しかし、これらのデバイスのディスプレイ表面はガラスなどの平面により構成されているものがほとんどであり、情報が存在する仮想空間と人が存在する現実空間には隔たりがある。つまり人と情報のインタラクションは平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。

これらの光学的なディスプレイに対し、実体を伴う素材によりピクセルを構成し情報を提示するディスプレイ（実体ディスプレイ）に関する研究がなされるようになった。

情報提示に実体を用いることにより、視覚だけでなく、質感や凹凸を加えた直感的な理解を促すことが可能となる。さらに、我々の身近に存在し慣れ親しんだ実体を用いれば、人が日常においてその実体とインタラクションする際に用いる方法によって情報とのインタラクションを行うことが可能である。

我々は、実体ディスプレイの構成要素として結露を用いたディスプレイ Ketsuro-Graffiti を提案し、検討を進めている。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広く行われており、結露は我々にとって身近な空間に存在するキャンバスかつ情報提示の 1 つであると言える。結露による情報の提示によって、人は指でディスプレイに触れて情報を消したり、息を吹きかけて再び情報を発生させるといった、普段結露に対して行う方法を用いて情報とインタラクションできると考えられる。また、窓や鏡などの身近な物体を用いて情報提示を行うことができるため、環境に溶け込むアンビエントなディスプレイを実現することができる。我々はこれまで、Ketsuro-Graffiti のプロトタイプの実装を実施し、特に結露生成機構について検討してきた[1][2][3]。本稿では、結露

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

の生成・消滅だけでなく階調値としての濃淡を制御するための手法について検討し、PID 制御による結露生成機構の実装について述べる。さらに、実装したシステムを用いた濃淡制御における、濃淡提示の機能評価のために行った実験について述べる。

2. 関連研究

2.1 実体ディスプレイ

Shaboned Display[4]は、シャボン玉によりピクセルを構成するディスプレイであり、視覚的な美しさや環境による変化、触れて壊したくなるなどのシャボン玉のもつ特性を用いたものである。MOSS-xels[5]は、コケによりピクセルを構成するディスプレイであり、植物の持つ特性を活かしたままその振る舞いを緩やかに制御することにより、自然環境に溶けこむアンビエントなディスプレイの可能性を提示している。MisTable[6]は、共有のテーブルトップディスプレイに霧を用いたパーソナルスクリーンを組み合わせたシステムである。霧がシースルー、リーチスルーであることを利用しており、ユーザはフォグスクリーンの向こうの共有ディスプレイの情報にアクセスすることができる。

これらは我々にとって身近な存在である実体を用いたディスプレイであるが、シャボン玉やコケ、水などの実体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。人が普段実物体に対して行う身近な方法を用いて情報とインタラクションすることができれば、より直感的な方法で容易に扱えるディスプレイを実現できると考えられる。結露は人々の身近に存在し、指で触れて描画する行為は広く行われているものである。我々は結露を用いて情報を提示することにより、情報との自然なインタラクションを可能にするディスプレイを提案する。

2.2 温度変化を用いたディスプレイ

本節では、温度変化を用いて情報の入出力を行う研究について述べる。これらには、触覚情報として冷温提示を行うものや、温度変化を利用して実体の視覚的情報を変化させるものが存在する。

Thermoesthesia[7]は、50 インチのインタラクティブテーブルトップ触視覚ディスプレイであり、ユーザが触れた位置に映像と冷温を同期して提示するものである。Thermo-Pict neo[8]は9インチの冷温提示ディスプレイにサーモグラフシートを用いてこれらは温覚提示ディスプレイの可能性を提示したものであるが、温度制御ではディスプレイ表面温度のフィードバックが行われておらず、数段階のデューティ比によりペルチェ素子を開ループ制御しているのみである。そのため、温度を細かく制御することは難しく、提示される温度は環境によって変化する。本研究では、表面温度をフィードバックしPID制御を行うことにより、環境の影響を受けずに精密に温度を制御するシステム

を実装する。

Mosaic Textile[9]は、温度変化を用いて織物の塗料の色を制御する実体ディスプレイである。衣服やなどの人々の周りに存在する実体を用いて情報を提示できる。Evaporation Display[10]は、水筆複合紙の温度を制御して水の蒸発速度を変化させ、“じわじわ”とした乾湿感の変化を利用したディスプレイである。Dewy[11]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構成するディスプレイである。既存の光学的なディスプレイの代替として、自然な現象を用いることにより環境に溶けこむディスプレイの可能性を提示している。このディスプレイでは水滴を用いているが、筐体内部に水滴が存在するため、ユーザは水滴に触れることはできず、指で描画するなどのインタラクションは不可能である。

3. 結露を用いたディスプレイ Ketsuro-Graffiti

3.1 結露発生条件と濃淡制御手法についての検討

結露の生成・消滅を自由に制御するために、どのような条件において結露が発生するのかを検討する。結露は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発生する。室温 T_r [°C]において、空気中の飽和水蒸気圧 $p_r(T_r)$ [hPa]は、Tetens の式により以下の式 (1) で近似的に表される[12].

$$p_r(T_r) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_r}{T_r+237.3}} \quad (1)$$

また、室温 T_r [°C]及び相対湿度 h [%]において、室内の水蒸気圧 p_d [hPa]は、以下の式 (2) で算出される。

$$p_d(T_r) = p_r(T_r) \times \frac{h}{100} \quad (2)$$

さらに、式 (1) を T_r について解き、 $p_r(T_r)$ に $p_d(T_r)$ を代入して室内の水蒸気圧と等しい飽和水蒸気圧となる温度を求めることにより、露点を求めることができる。つまり、室温 T_r [°C]での露点 T_d [°C]は、以下の式 (3) で算出される。露点とは、水蒸気を含む空気を冷却したときに、凝縮（凝結）が始まる温度のことである。

$$T_d = \frac{237.3 \times \log_{10} \frac{6.1078 p_d(T_r)}{6.1078}}{\log_{10} \frac{p_d(T_r)}{6.1078} - 7.5} \quad (3)$$

このように、室温と湿度から室内の露点を求めることができ、露点と物体の表面温度の高低を制御することにより、物体表面の結露の生成・消滅を制御することができると考えられる。

次に、結露の濃淡制御手法について検討する。物体表面温度が露点 T_d [°C]のときの物体周辺の水蒸気量 $a(T_d)$ [g/m³]は、以下の式 (4) で算出される。これはこの室内における飽和水蒸気量である。

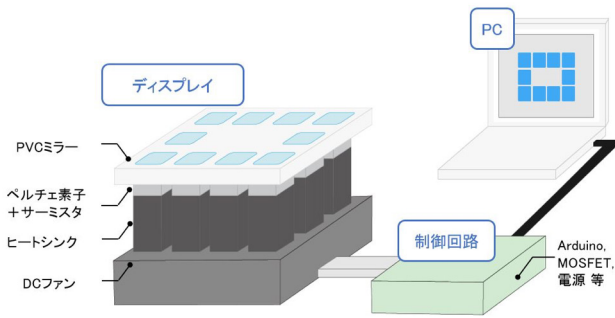


図1 システム構成

Figure 1 System configuration.

$$a(T_d) = \frac{217 \times p_r(T_d)}{T_d + 273.15} \quad (4)$$

物体表面温度を露点以下の T [°C]に制御したとき、物体周囲での飽和水蒸気量は $a(T)$ [g/m³] ($< a(T_d)$)となり、空気中に安定して存在することのできない水蒸気は凝縮し結露となる。つまり、露点 T_d [°C]の室内で物体を T [°C]に制御したときに凝縮する水蒸気量 $d(T, T_d)$ [g/m³]は以下の式 (5) で算出される。

$$d(T, T_d) = \frac{217 \times p_r(T_d)}{T_d + 273.15} - \frac{217 \times p_r(T)}{T + 273.15} \quad (5)$$

この式を用いて温度制御を行うことにより、凝縮する水蒸気量を制御し、結露の濃淡を制御することが可能となる。また、室温と湿度から露点を求めてから温度制御を行うため、環境条件に影響されずに濃淡を制御することができる。

3.2 システム構成

システムの概要を図1に示す。本研究では、冷却素子としてペルチェ素子、温度センサとしてサーミスタを用いる。これらを密着させてマトリクス状に並べ、各ペルチェ素子の温度をフィードバック制御することにより、ディスプレイ面の温度分布を制御する。ディスプレイ面の素材にはペルチェ素子による結露発生に最適な[3]PVC (塩化ビニル)ミラーを用いる。

実装した冷却部のプロトタイプを図2に示す。8.3mm四方のペルチェ素子 TEFC1-03112 (日本テクモ)を2×2のマトリクス状に並べ、各ペルチェ素子上にサーミスタ 56A1002-C3 (ALPHA TECHNICS)を配置する。熱伝導両面テープ (3M)を用いてペルチェ素子とサーミスタを固定し、ヒートシンクおよびディスプレイ面とペルチェ素子の間には放熱用シリコンを塗布する。システムの制御にはArduino UNOを用いる。RC回路によってローパスフィルタを構成し、サーミスタのノイズ除去を行う。各ピクセルの階調値は制御用PCによって管理し、GUIアプリケーションによる簡易な操作を実現する。また、温度制御手法としてPID制御を用いる。PID制御はモータ制御などに用いられるフィードバック制御法であり、比例動作、積分動作、微分動作を組み合わせたものである[13]。操作量を調整することにより、単純なON-OFF制御を用いる場合よりも良

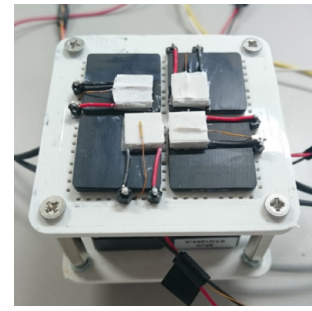


図2 実装した冷却部 (2x2)

Figure 2 Implemented cooling parts (2x2).

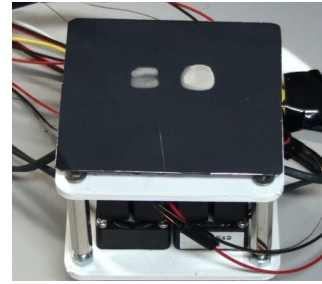


図3 濃淡制御 (左: 淡, 右: 濃)

Figure 3 Thickness control
(left: thin, right: thick).

い制御特性が得られる。これにより、ディスプレイ面の温度を目標温度に近い温度でなめらかに保つことができる。PID制御によって結露を生成し、濃淡表現を行った結果を図3に示す。1ピクセルのサイズは約8.3mm四方である。4章において、結露の濃淡制御の性能評価を行う。

3.3 タッチ検出

前節で述べたようにPID制御では温度をなめらかに保つことができる。ある一定温度の定常状態でユーザが指でディスプレイ面に触れると、接触箇所の温度が急激に上昇する。この温度上昇を認識することにより、ユーザのタッチを検出することができる。ペルチェ素子と温度センサを用いてタッチ検出を行う手法はPeirisらのTempTouchでも提案されている[14]。

この手法と他のタッチ検出手法との差異について述べる。他の検出方法として、静電容量方式や抵抗膜方式のタッチセンサを用いる手法が存在する。この場合、ディスプレイ面のPVCミラー上部にセンサを配置する必要があり、結露の発生時間や視認性に大きな影響があると考えられる。また、Kinect等を用いて赤外線情報から検出する手法も考えられるが、オクルージョンによりマルチタッチ検出が難しい場合があるという問題や、タッチ検出の解像度が十分でないという問題が存在する。いずれの検出方法においても、システムに何らかのハードウェアを追加する必要があり、環境に溶け込むアンビエントなディスプレイという利点に支障をきたす可能性がある。一方、PID制御によるタッチ検出手法ではハードウェアを追加する必要がなく、上記の問題は発生しない。各ピクセルの温度を個別に管理す

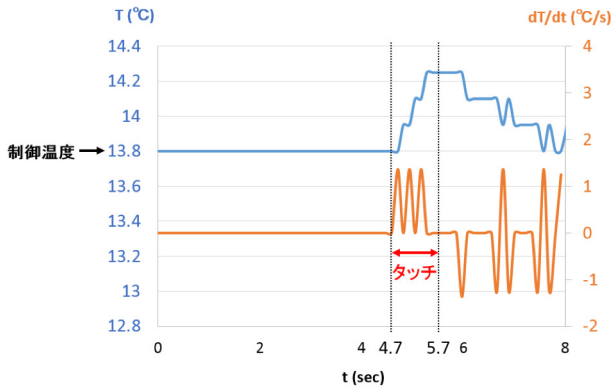


図 4 タッチによる温度変化

Figure 4 Temperature change by touch.

るため、それぞれ独立にタッチ検出を行うことができ、マルチタッチや解像度の問題も発生しない。

実装したシステムで PID 制御により温度を一定に保ち、指でディスプレイ面にタッチした際の温度変化とその微分値を図 4 に示す。PID 制御による制御温度は 13.8°C である。0 秒から 4.7 秒までの安定した状態では、温度変化はなく微分値も 0 である。4.7 秒時点でタッチすると、温度が上昇し微分値も急激に増加している。したがって、微分値が閾値を超えたことを検出することによりタッチ検出が可能である。図 4 より、実装システムではタッチ検出の閾値を微分値 1.0 [°C/s] とすればタッチ検出が可能である。一度検出してから一定時間後に再度安定して微分値が十分小さくなるまでは検出を行わないことにより、一度のタッチを複数回検出してしまうことを防ぐ。タッチ終了時の認識時間や、指の温度や環境によらずタッチ検出できるかどうかを評価することは今後の課題である。

4. 濃淡提示機能の評価

4.1 鏡面光沢度の測定による濃淡表現の評価

本節では、PID 制御を用いた結露の濃淡制御の性能を評価する。まず評価手法について述べる。ディスプレイ面に結露が発生すると水滴によって光が拡散反射するため、鏡面反射率が小さくなる。日本工業規格 (JIS) では、鏡面光沢を「主として鏡面反射光の強さによって定められる視知覚の属性」、鏡面光沢度を「鏡面光沢の度合を測定して、数値で表したものと定義している¹⁾。この規格では、可視波長範囲全域にわたって屈折率が一定値 1.567 であるガラス表面において、入射角 60° の鏡面光沢度 0.10 を基準とし、この値を 100% としてそれに対する相対値として鏡面光沢度を表す。鏡面光沢度を測定することにより、生成した結露の濃淡を定量的に評価することができると考えられる。

2×2 ピクセルのプロトタイプを用いて、ディスプレイ表面温度を露点+5°C から露点-10°C まで、16 段階で十分時間をかけて一定に保ち、そのときのディスプレイ表面の光沢

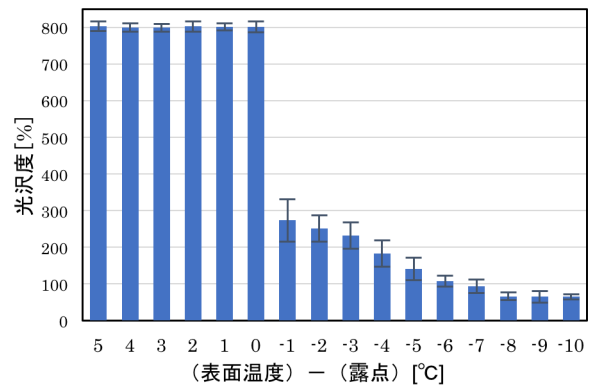


図 5 表面温度による光沢度の変化

Figure 5 Surface temperature vs. glossiness.

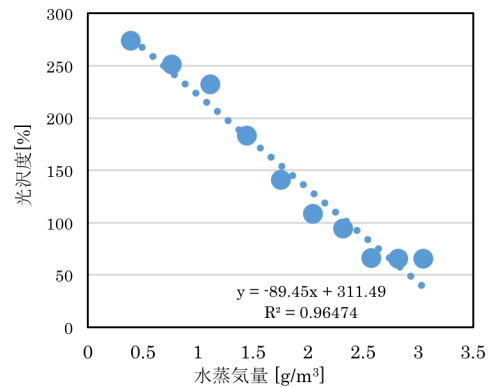


図 6 凝縮した水蒸気量と光沢度の関係

Figure 6 Amount of water vapor vs. glossiness.

度を各 10 回測定した。実験室内の室温は 19.3°C、湿度は 34.4%、露点は式 (3) より 3.22°C であった。光沢度の測定にはグロスチェッカ IG-410 (堀場製作所、測定範囲 0-1000%)、室温および湿度の測定には温湿度センサ HTU21D (SparkFun) を用いた。

実験結果を図 5 に示す。各温度における光沢度の平均、標準偏差を示している。この結果より、表面温度が露点より低くなったときに結露が発生して光沢度が小さくなっており、表面温度が露点より低い場合において光沢度は最大 273.5% から最小 65.0% まで変化していることがわかる。表面温度が露点より低い場合について、式 (5) により求められる凝縮した水蒸気量と光沢度をプロットしたグラフを図 6 に示す。これより、凝縮した水蒸気量、つまり結露の濃淡と光沢度の関係は線形の回帰式で表すことができ、決定係数は 0.9647 であった。以上より、表面温度を制御して凝縮する水蒸気量を制御することにより、ディスプレイ表面の鏡面光沢度を制御可能であることが示唆された。ただし、芹川らが主張するように[15]、物理的な光沢度と人間の知覚する心理的な光沢度には隔たりがあるため、濃淡を細かく変化させたとしても、その変化を人間が知覚することができるとは言えない。そこで次節で被験者実験により提示された濃淡に対する知覚評価を実施する。

1 JISZ8741, 鏡面光沢度-測定方法,

表 1 凝縮した水蒸気量と濃淡の推定値の関係

Table 1 Amount of water vapor vs. estimated value of thickness.

水蒸気量 [g/m ³]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
濃淡の推定値	-1.687	-1.320	-0.800	-0.367	0.120	0.353	0.620	0.853	0.987	1.240
推定値の差		0.367	0.520	0.433	0.487	0.233	0.267	0.233	0.133	0.253

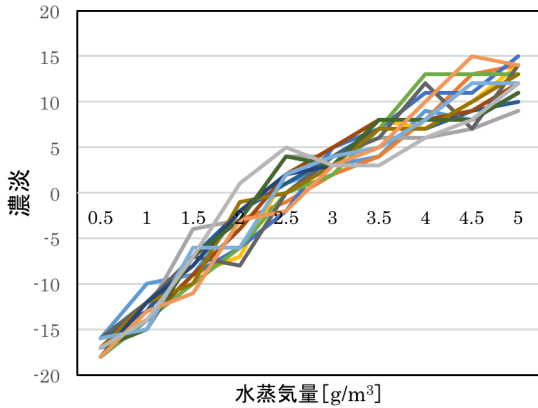


図 7 被験者毎のスコア合計

Figure 7 Total score of each subject.

4.2 濃淡制御の主観評価

前節の実験によって、提案システムを用いて凝縮する水蒸気量を制御することにより、鏡面光沢度を変化させ、結露の視覚的な濃淡を制御できることが示唆された。本節では、凝縮する水蒸気量を制御した際に、人が何段階の濃淡を知覚できるか評価する。

実験手法として、官能検査手法の一つである Scheffe の一対比較法（中屋の変法）を用いる[16]。実験手順について述べる。まず、10段階の水蒸気量の結露からランダムに2つ（結露 L、結露 R）選択し、それらを被験者に同時に提示する。各段階間の水蒸気量の差は 0.5g/m³ であり、範囲は 0.5 g/m³~5 g/m³ である。被験者は、提示された2つの結露の濃さ（d_L, d_R）について、下記のように5段階でスコアを付ける。

- d_L ≫ d_R なら、結露 L : 2点, 結露 R : -2点
- d_L > d_R なら、結露 L : 1点, 結露 R : -1点
- d_L = d_R なら、結露 L : 0点, 結露 R : 0点
- d_L < d_R なら、結露 L : -1点, 結露 R : 1点
- d_L ≪ d_R なら、結露 L : -2点, 結露 R : 2点

一人の被験者につき、 ${}_{10}C_2 = 45$ 通りの組合せ全てを被験者ごとにランダムに提示する。実験は暗室で行い、ディスプレイに対して水平面より約 30° 上の方向に光源（50SM-03B3-AB, ヤマギワ）を置いた[15]。被験者は15名の大学生であり、男性14名、女性1名であった。これらの評点をもとに、分散分析および多重比較を行う。

実験結果を図7、表1に示す。図7は被験者毎のスコアの合計、表1はそれより得られた濃淡の推定値を示している。これらから得られた分散分析表を表2に示す。各要因のF値は、

表 2 分散分析表

Table 2 Analysis of variance table.

要因	平方和	自由度	不偏分散	F
主効果	1368.69	9	152.08	527.29**
主効果×個人	46.51	126	0.37	1.28*
組み合わせ効果	115.44	36	3.21	11.12**
誤差	145.36	504	0.29	
総平方和	1676	675		

主効果 : $F_{504}^9(0.05) = 1.898, F_{504}^9(0.01) = 2.443$

主効果×個人 : $F_{504}^{126}(0.05) = 1.250, F_{504}^{126}(0.01) = 1.369$

組み合わせ : $F_{504}^{36}(0.05) = 1.440, F_{504}^{36}(0.01) = 1.668$

であるから、主効果が有意であることがわかった ($F(9, 504) = 527.29, p < 0.05$)。これより、10段階の濃淡表現間のどこかに有意差があることがわかった。個人差と組合せ効果にも有意差があるが、主効果と比べるとF値との差は小さいため、これらの差は若干だと見なせる。

次に、どの濃淡表現間に有意差があるかを調べるために、多重比較を行う。まず、以下の(6)式によって比較のための基準ヤードスティック Y_ϕ を計算する。

$$Y_\phi = q_\phi \sqrt{\sigma^2 / tN} \quad (6)$$

ただし、 q_ϕ はスチューデント化された範囲 $q_\phi(t, f)$ 、 t は評価対象数、 f は分散分析表での誤差の自由度、 σ^2 は分散分析表での誤差の不偏分散、 N は被験者数である。本実験の場合、 $q_\phi = 4.51, \sigma^2 = 0.288, t = 10, N = 15$ であるから、

$$Y_\phi = 4.51 \sqrt{0.288 / (10 \cdot 15)} = 0.198$$

となる。ヤードスティックを用いて各濃淡表現間の信頼区間を求め、各信頼区間が正負にまたがるかどうかを調べることで、各濃淡表現間の差が有意であるかどうかを調べることができる。これは、各濃淡表現間の推定値の差がヤードスティックより大きいかどうかを見ることによっても調べることができる。表1の推定値の差を見ると、水蒸気量4と水蒸気量4.5の間では推定値の差が0.133とヤードスティックより小さいが、それ以外の濃淡表現間では全てヤードスティックより大きい。すなわち、水蒸気量4と水蒸気量4.5の間では差が有意ではないが、それ以外の濃淡表現間では差が有意である。これより、水蒸気量0.5を階調値1、水蒸気量1を階調値2、…、水蒸気量4を階調値8、水蒸気量4.5または水蒸気量5を階調値9として用いることにより、提案システムを用いれば有意に差がある9段階の結露の濃淡を表現することができることがわかった。



図 8 9段階の濃淡表現

Figure 8 Nine thickness of water condensation

実際に9段階の濃淡を表現している様子を図8に示す。

5. 応用

提案システムの応用として、住宅や飲食店などの建物の窓や鏡に結露を発生させ、情報提示に使用することなどが考えられる。特に、このようなディスプレイをデジタルサイネージに用いることにより、人々が近づいて触れたいようなサイネージを実現できる。実際に我々が以前国際会議で展示を行った際には、我々の説明を聞く前に自発的に来場者がディスプレイ面の結露に触れる様子が多く見受けられた。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。さらに鏡が現実空間の事象を鏡像として映すのに加え、表面に結露を発生させることでAR（拡張現実感）提示ディスプレイとしても利用できる。一方、現在の制御機構を窓に用いるのは難しく、窓への応用のためには温度を間接的に制御する機構を実装する必要がある。窓全面を冷却し結露が発生した状態で、赤外線光とガルバノミラーにより加熱し結露を消滅させる箇所を制御する手法などが考えられる。

前章で述べたように、ディスプレイ面に発生した結露の濃淡に応じて、発生した箇所の鏡面反射率を変更できる。この特徴を利用し、部分的に鏡面反射率を変更できるプログラマブルな鏡を実現することができる。例えば、鏡の一部に結露を発生させることにより、その部分をスクリーンとして用いることができる。これを利用し、ユーザの動きに応じて投影箇所と映像を変化させ、実際の鏡を用いたAR試着システムを実現することができる。既存の大型ディスプレイによるシステムよりも、より現実の試着に近い体験を提供することができると考えられる。また、RekimotoのSquama[17]では、窓の部分的な透明度を制御することによる「実世界モザイク」が提案されている。プログラマブルな鏡を用いて部分的に鏡面反射率を制御することにより、「実世界モザイク」を鏡に実現することができる。例えば、トイレや銭湯などの鏡に適用して特定の物体のみを見えなくするようにすることにより、このような場面でのプライバシー確保に利用できる。

6. おわりに

本稿では、結露によりピクセルを構成し情報を提示するディスプレイ Ketsuro-Graffiti の濃淡制御手法について検討した。結露が発生する条件、濃淡を制御するための手法について検討し、マトリクス状に配置したペルチェ素子アレ

イの温度を個別に制御する結露生成機構を実装した。濃淡制御を定量的に評価するために、ディスプレイ表面温度を変化させた際の光沢度の変化を測定した。結果より、表面温度と露点の差によって光沢度が変化し、結露の濃淡を制御できることが示唆された。さらに、何段階の濃淡を人が知覚することができるかを調べる被験者実験を行った。その結果、9段階の濃淡に有意差が見られ、提案システムにより9段階の濃淡を制御できることがわかった。

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、より豊かなインタラクションの実現、濃淡の遷移にかかる時間の評価、様々な環境下でのシステムの安定性の評価などについて検討していきたい。

参考文献

- [1] 宮崎陽平 et al. “ケツログラフィティ: 結露を用いたインタラクティブディスプレイ,” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集, 2013, p. 238-241.
- [2] Tsujimoto, Y. et al. “Ketsuro-Graffiti: A Canvas with Computer Generated Water Condensation,” In *Proc. SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, 2015, p. 15:1-15:2.
- [3] 辻本祐輝 et al. “Ketsuro-Graffiti: 結露を用いたインタラクティブディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2016, vol. 21, no. 3, p. 513-520.
- [4] Hirayama, S. and Kakehi, Y. “Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles,” In *Proc. SIGGRAPH 2010 Posters*, 2010, p. 28:1-28:1.
- [5] Kimura, T. and Kakehi, Y. “MOSS-xels: Slow Changing Pixels Using the Shape of Racomitrium Canescens,” In *Proc. SIGGRAPH 2014 Posters*, 2014, p. 20:1-20:1.
- [6] Martinez, P. D. et al. “MisTable: Reach-through Personal Screens for Tabletops,” In *Proc. CHI '14*, 2014, p. 3493-3502.
- [7] Kushiya, K. et al. “Thermoesthesia: About Collaboration of an Artist and a Scientist,” In *Proc. SIGGRAPH 2006 Educators Program*, 2006, article 23.
- [8] Kushiya, K. et al. “Temperature Design Display Device to Use Peltier Elements and Liquid Crystal Thermograph Sheet: ‘Thermo-Pict Neo’,” In *Proc. SIGGRAPH 2010 Posters*, 2010, article 42.
- [9] Wakita, A. and Shibutani, M. “Mosaic textile: wearable ambient display with non-emissive color-changing modules,” In *Proc. ACE '06*, 2006, p. 48:1-48:7.
- [10] 堤修平 et al. “Evaporation Display:水の蒸発速度の違いを利用した情報提示システム,” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013, 2013, p. 56-61.
- [11] Parkes, A. and Offenhuber, D. “Dewy: A Condensation Display,” In *Proc. SIGGRAPH 2007 Posters*, 2007, article 44.
- [12] Tetens, O. “Über einige meteorologische begriffe,” *Geophys.*, 1930, vol.6, p.297-309.
- [13] 森泰親. “制御工学”, コロナ社, 2001.
- [14] Peiris, R. L. and Nakatsu, R. “TempTouch: A Novel Touch Sensor Using Temperature Controllers for Surface Based Textile Displays,” In *Proc. ITS '13*, 2013, p. 105-114
- [15] 芹川聖一, 下村輝夫. “視覚特性を考慮した光沢度計測,” 応用物理, 1997, vol. 66, no. 10, p. 1067-1072.
- [16] 日科技連官能検査委員会. “官能検査ハンドブック,” 日科技連, 1973, 379p.
- [17] Rekimoto, J. “Squama: modular visibility control of walls and windows for programmable physical architectures,” In *Proc. AVI '12*, 2012, p. 168-171.