

Wet Display: 視覚的乾湿感を用いた情報提示システム

松下 光範^{1,a)} 束川 卓也^{1,†1}

概要: 本研究では, 視覚的乾湿感の変化を用いた情報提示システム「Wet Display」を提案する. 視覚的乾湿感とは, 雨が降ったときの道路に見られるような, 表面が濡れることによって生じる色調の変化である. 提案するシステムは, この現象を情報提示に利用したものであり, 水槽のような小さなセルをマトリクス状に配し, それぞれのセルに透明アクリル板や黒色ゴム板の欠片でできた擬似アスファルトを敷き詰めている. このセルに水が蓄えられると乾湿感が変化する. 各セルの保水/排水を制御することで, 水が蓄えられたときに素材の表面にパタンを描くことができる. 本稿では, 5×5のセルで構成されたプロトタイプシステムを作成し, それを用いて(1)排水時の色調変化の時間的推移,(2)排水性能,(3)光源の強さと視認性の関係,(4)有効視野角,に関する実験を行い, ディスプレイとしての利用可能性を検証した.

キーワード: 視覚的乾湿感, 非発光ディスプレイ, 情報提示システム

1. はじめに

近年, 自然の振る舞いをコントロールする方法を用いた情報提示手法が注目を集めている. 例えば, (株) 光栄の Space Printer [2] は空中を落下する水滴をコントロールし空中に模様を描くディスプレイである. 空中に掛けられたブリッジ内に配置された排水装置列から大粒の水滴を任意のパターンで落下させる事により, ブリッジの下の空間に数秒間, 水系でできた文字や絵を浮かび上がらせる. 水系は完全に落下すると装置の下部にある水槽に消えてなくなるので, 次々と文字を映し出す事ができる. また, Rozin の Wooden Mirror [1] は, 大きな鏡を模した木製のディスプレイである. 木のフレームの中に 800 個以上の小さな木の板が整然と配置され, それぞれの木板を微妙に上下に動作させる事により木板に差し込む光の反射と影を調節して作品の前に立つ人の画像を映し出している. 物体の動きと影の発生という現象が描画に利用されている. このように, 従来の光学ディスプレイではない, 自然現象を用いた情報提示手法が数多く提案されているが, これらの多くは自然になじむ表現であることと, 描画された情報の視認性の高さを有すること, のふたつの要件を同時に満たしているとは言いがたい.

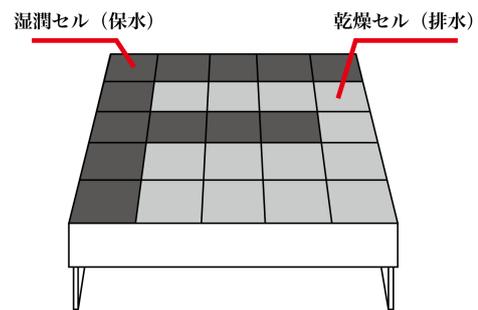


図 1 システム概要

本研究では自然現象による情報提示の一環として, 降水時の地面の色調変化に着目し, 地面が濡れたときに観測できる視覚的な乾湿感を制御することで情報提示を行うディスプレイを提案する. 「雨によって道路などの地面が濡れて色を変える」という現象は我々の日常でありふれた身近な現象であり, 乾燥時と湿潤時の差の視認性も高い.

提案するシステムの概要を図 1 に示す. 提案システムは複数の水槽のような小さなセルで構成され, それぞれのセルに地面の役割となる素材を敷き詰め, そのセルの保水/排水の状態を制御して, 素材の表面に現れる視覚的乾湿感を表現する. このセルをマトリクス状に配置し, 各々の視覚的乾湿感の組み合わせによってドット絵のような表現を生成できるようにする.

2. 乾湿感提示素材の検討

道路が濡れる事で色が変わるといった地面の視覚的乾湿

¹ 関西大学
Kansai University, 2-1-1 Ryozenji-cho, Takatsuki, Osaka
569-1095, Japan

^{†1} 現在, コナミデジタルエンタテインメント
Presently with Konami Digital Entertainment Co., Ltd.

^{a)} mat@res.kutc.kansai-u.ac.jp

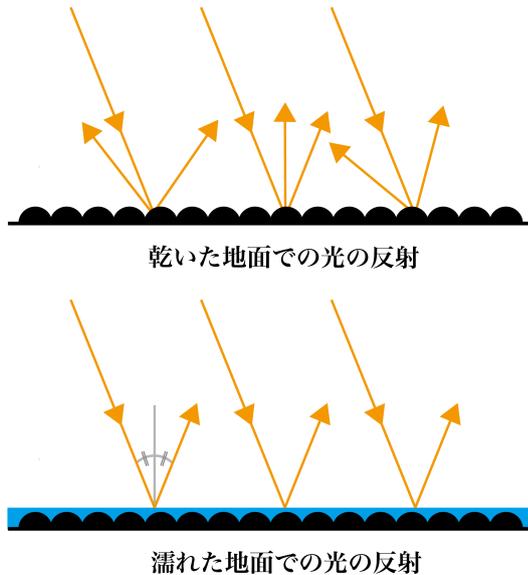


図 2 乾いた地面と濡れた地面での光の反射の違い

感の変化は、図 2 に示すように地表面の凹凸で生じる光の乱反射が水の浸入によって低減し、それによって地面の色調が変化することで生じる [7] .

このメカニズムに照らすと、視覚的乾湿感を表現するための素材は、表面に凹凸が多く存在し、光の乱反射が起きやすいものが望ましい。また、乾燥状態から湿潤状態に移る際の色調変化だけでなく、湿潤状態から乾燥状態へ移る際の色調変化についても考慮しなくてはならない。したがって、本システムの実装には、乱反射の起きやすさと水捌けの良さを同時に満たす素材を選定する必要がある。

道路のアスファルトや運動場の土など、地面を構成する一般的な素材の場合、乾燥状態から湿潤状態への変化は短時間で生じるが、細かい凹凸が多く水の吸収率が高いため、湿潤状態から乾燥状態に変化する際には時間が掛かったり、多くの熱エネルギーを必要としたりする。そのため、ディスプレイとしての利用には適していない。

そこで、アスファルト道路の素材組成を参考にしつつ、それを排水性に優れた別の素材で再現するための検討を行った。アスファルト道路はアスファルト混合物と呼ばれ、碎石による粗骨材と川砂、山砂、海砂などの細かい砂利による細骨材の混合物をフィラーと呼ばれる石灰石の粉末と石油由来のアスファルトで固定させたものである [9] . 大きさの異なる複数の素材が混合しているというアスファルト道路の構造を参考に、吸水率の低い透明アクリル板とゴム板をランダムな大きさに切り出し、それらをアスファルト道路で用いられている素材の代替物として応用することとした。

切り出したこれらの素材片を (1) 透明アクリル片のみ、(2) ゴム片のみ、(3) 両素材を 1:1 の割合で混合、の 3 条

	透明アクリル	ゴム	混合物
注水前			
注水後			

図 3 透明アクリル、ゴム、混合物への注水による色調の変化

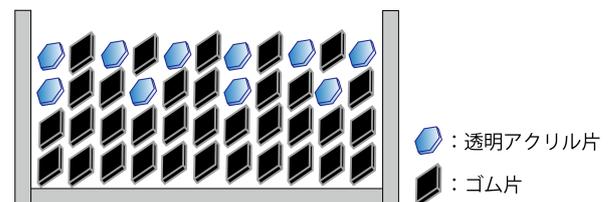


図 4 透明アクリル片とゴム片の配列



図 5 混合物 (ゴム片:アクリル片=7:3) への注水による色調変化

件で水槽のセルに各々充填して、注水による色調変化を観察した。その結果を図 3 に示す。この図に示すように、透明アクリル片およびゴム片のみの条件では水を注いだ後の色調の変化があまり見られない。一方、アクリル片とゴム片を混合した条件では一定の色調変化が観察された。

これに基づき、両素材の混合割合とそれらのセルへの充填方法についての試行錯誤を行った。その結果、図 4 のように、混合割合を透明アクリル片:ゴム片=7:3 とし、ゴム片の分布を底部側、アクリル片の分布を上面側になるように充填した場合に最も良好な色調変化が得られることが分かった。図 5 に注水時の色調変化の様子を示す。この図から分かるように、注水後の素材表面はアクリルの白い乱反射が低減し、全体的に黒っぽい色に変化している。本研究では、この配合の混合物を“擬似アスファルト”と呼び、提案システムの充填素材として採用することとした。

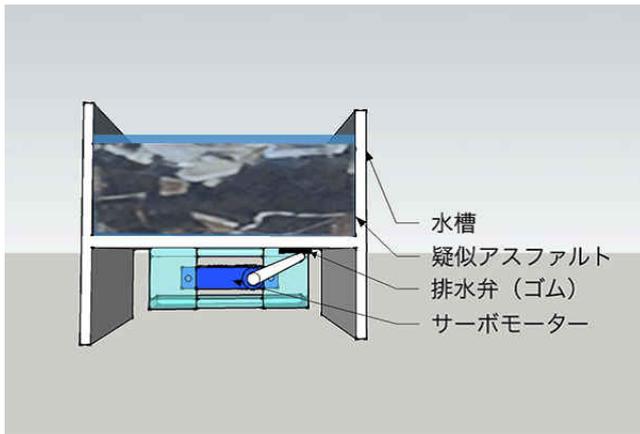


図 6 セルの構造



図 7 システムの描画 (左: 乾燥状態, 右: 描画状態)

3. 実装

1章で述べたような構造を持つシステムのプロトタイプとして、縦5マス、横5マスの計25マスから構成される水槽型のディスプレイを実装した。水槽の各マスがドット表現するためのピクセルに相当する。水槽の各セルは、注水などによる負荷に対する耐久性と加工の容易さを考慮して厚さ3mmのアクリル板を使用した。水槽内に保持する水量を調節するため、それぞれのセルの底に直径5mmの排水口を設けた(図6参照)。サーボモータのアームの先端に取り付けられたゴム板の排水弁が、サーボモータの駆動により排水口に接して蓋となることで、保水/排水を制御する構造となっている。

本実装では、サーボモータに TowerPro MicroServo SG90 (動作電圧 3.5-7.0V) を使用した。計算機で各セルのサーボアームを上下させて水槽内の水の保水/排水を制御した。

実際にシステムが行った描画を図7に示す。左図が乾燥セルのみの場合であり全体的に白っぽく見えている。まんべんなく注水して全てを湿潤状態にした後、一部のセルを排水状態にしたものが右図である。湿潤状態のセルは黒っぽく、乾燥セルは白っぽく見え、コントラストをなしている(右図では乾燥セルで“S”の文字を描いている)。

4. 実験 1: 排水時の色調変化の時間的推移

本システムは保水/排水によって各セルの色調を切り替

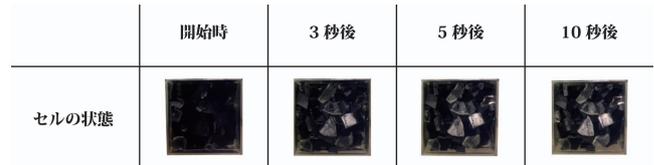


図 8 排水によるセルの変化

	排水時間	平均排水速度
セル A	31 秒	2.9ml/sec
セル B	34 秒	2.6ml/sec
セル C	44 秒	2.0ml/sec

えることで描画を行う。そのため、本システムを用いて湿潤状態から排水を行った際に想定した色調変化が起こるかを検証した。

湿潤状態のセルをふたつ用意し、排水弁を開放して排水を行った。このとき、時間経過と共に起こるセル上の変化の様子を動画に撮影した。なお撮影の際のカメラの露光は固定とした。

排水に伴う湿潤状態セルからの変化の様子を図8に示す。この図に示すように、排水から5秒以内に視覚的乾燥感へ変化し、以降は殆ど変化しなかった。

5. 実験 2: 排水性能の評価

本システムでは、降水などによる注水を描画のきっかけとしている。そのため、安定した描画を行うには注水される水量と排水される水量のバランスをとる必要がある。例えば、雨天の際の継続的な降水に対して、排水量が降水量を下回っている場合は、視覚的乾燥感を表現できない。そこで、実装したプロトタイプシステムの排水性能を検証するための実験を行った。本実験では湿潤状態であるセルから排水を開始し、その時点から排水終了までの所要時間を計測した。

本システムの一セルの内寸は 60mm × 60mm × 50mm である。そこに擬似アスファルトを 40mm の高さまで充填し、その擬似アスファルトが全て浸水する高さまでの水量を3つのセルで計測した。その結果、1セルあたり約90mlの水を注ぐことで擬似アスファルトが浸水することが確認された。次にこの状態から排水によって色調変化が起こる際の経過時間を測定した。その結果を表1に示す。排水完了までの時間は平均36.3秒で、排水速度は平均2.5ml/secであった。大阪の2012年の最大10分間降水量が22.5mm [6](この量の雨がセルに降ったと仮定した場合、開口面積を考慮するとセルへの注水速度は0.135ml/sec)であったことを鑑みると、この結果は本システムを降雨時に利用した場合でも十分な排水性能を有していることを示している。

6. 実験 3: 光源の強さと視認性の関係

本システムはシステム自体の発光ではなく、環境に依存する外光などを描画に利用している。そのため、描画内容の視認性が光源の強さに大きく影響を受ける事が考えられる。そこで、光源の強さと描画に起こる変化を把握するための実験を行った。

2 個の白熱電球を同時に点灯させる事のできる室内照明の 1500mm 下にシステムを設置した。電球を 2 個とも点灯させた場合、1 個だけ点灯させた場合、両方消灯させた場合（室内の自然光）の 3 条件の光源下で、乾燥状態のセルと湿潤状態のセルそれぞれの明度を測定した。まず、乾燥状態のセルを無作為にふたつ選んでセル A とセル B とし、上記 3 条件の光源下で撮像した。次に、それらのセルに注水を行って湿潤セルに変化させ、乾燥状態のときと同様に、3 条件の光源下で撮像した。それらの平均明度を 256 段階で計測し比較した。

撮像はディスプレイの 500mm 上面の正面位置にカメラを固定して行った。また、撮影に用いたカメラの露光は固定し、全ての写真で同じ設定を用いた。

各条件下で計測された乾湿状態と湿潤状態の明度値とその明度差、およびコントラスト比を表 2 に示す。この表からわかるように、光源の強さが減少すると、どのセルの明度も比例的に減少していることが分かる。また、湿潤状態のセルのほうが光源の現象の影響を強く受ける傾向がある。絶対的な明度の差は光源の強さと共に減少し、湿潤状態と乾燥状態の明度の相対的な明度差を表すコントラスト比は、光源が少なくなるほど大きくなる。そのため、必ずしも強い光源が、ディスプレイの表現の視認性を向上させるわけではなく、一定の明度とコントラスト比が確保される条件下での動作が望ましいといえる。

今回の実験では明るさを統制するために人工光の下で実験を行ったが、今後は実際の利用を想定して太陽光の下での実験を行う。

7. 実験 4: 有効視野角の検証

本システムは地面に水平に設置されるように設計され、観測される方向や角度は一般に正面から視られる光学ディスプレイと異なり様々である。そのため、光源の角度および観察角度の違いによって視認性にどのような影響が出るのかを実験した。

図 9 に示すとおり、ディスプレイの手前傾斜 30 度（光源位置 A）、真上（光源位置 B）、奥傾斜 30 度（光源位置 C）の 3 パタンの光源位置の下、ディスプレイの上面 80 度（観測点 1）と斜め前 45 度（観測点 2）の 2 点で観測し、湿潤状態のセルと乾燥状態のセルのそれぞれが示す明度の平均値を比較した。光源は、ディスプレイが置かれた地面

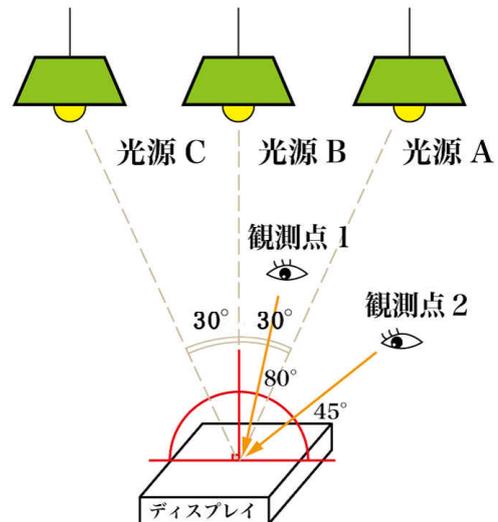


図 9 光源の位置と観測角度による明度の違いについての実験

から 1800mm に配置した。カメラの露光は固定し、各条件下での光源の強さも一定とした。計測は条件ごとに 2 度行い、その平均値を用いた。各条件下における明度の平均値とその明度差、また乾燥明度を湿潤明度で割算したコントラスト比率を表 3 に示す。

表 3 の実験結果が示すように光源位置が A の時に観測点 1 における平均明度の差が 41.1 と最も大きいことが確認された。また、他の観測条件においても、乾燥セルの明度は湿潤セルの約 1.6~2.1 倍であり、視覚的にもほとんど遜色なく白黒の違いを識別可能であった。このため、観測する角度や光源の位置が視認性に与える影響は大きくないと言える。

ただし、光源位置 C において明度差の減少が見られるように、湿潤セルの水面への正反射による光源の映り込みのために湿潤セルの明度が高くなる場合がある。このため、光源の正反射角上から観測すると、湿潤セルの明度が著しく高くなり、正常な表現の読み取りが不可能になる場合（本稿ではこのような現象を正反射エラーと呼ぶ）が確認された。

有効視野角に関しては、およそ 20 度~90 度の角度からの観測であれば、乾燥セルと湿潤セルの色調の差異が十分確認できることが確認された（ただし正反射エラーが生じている観測点を除く）。なお 20 度を下回る角度から観測すると一セルあたりの視野面積が狭くなり、ドット模様の読み取り自体が不可能になった。

正反射エラーが生じる一部の観測点と急角度での観測を除いては、安定して概ね正常な読み取りが行えることがこの実験によって確認された。

8. 議論

4 章から 7 章で行った実験から、提案したシステムによって一定の視認性を持った情報提示が可能である事が確

表 2 光源の強さと明度

	乾燥状態明度 (減少率)	湿潤状態明 (減少率)	明度差	コントラスト比率
電球 2 個	70.9	29.5	41.4	2.4
電球 1 個	45.7	15.8	29.9	2.9
自然光 (室内)	14.4	3.05	11.3	4.7

表 3 光源の位置と観測角度による明度の違い

光源位置	観測点位置	乾燥セル明度	湿潤セル明度	明度差	コントラスト比率
A	1	87.2	46.1	41.1	1.9
A	2	68.7	27.7	41.0	2.5
B	1	66.1	38.0	28.1	1.7
B	2	63.1	29.6	33.5	2.1
C	1	54.9	33.9	21.1	1.6
C	2	76.3	43.6	32.7	1.8

認められた。今後は、実際にこのシステムを地面などに埋め込むような形で屋外に設置し、降水などを利用した描画を行うことで、「雨天時にディスプレイとして動作する地面」といった環境に溶け込んだアンビエントディスプレイとして利用が見込める。また、継続的な降水に合わせた排水制御を行う事で、動的な情報提示が可能になると考えている。その一方で、いくつかの問題点も明らかになった。以下にそれらについて述べる。

8.1 正反射エラーについて

実験の章で述べた通り、湿潤セルでは、光源の正反射角上からの観測で、本来は湿潤することによって低下する明度が著しく上昇してしまう現象が確認された。これらの特定の位置からでは、正常なドット絵の読み取りは不可能になる。この問題は、現在の湿潤状態の擬似アスファルトが表面に多くの水が存在するために発生する。この問題を解決するには、より少ない水量で湿潤状態を表現できるように擬似アスファルトを改良したり、セルに必要な以上の水が溜まった際に自動的に排水するような機構を作る事で問題を低減できると考えている。また、光源の直接照射ではなく、間接照明などを利用する事で、この正反射エラーを回避できる可能性がある。この点については今後検討を進める。

8.2 擬似アスファルトの素材について

本研究で用いた擬似アスファルトは、視覚的乾湿感の表現の観点からは一定の成果を挙げたと言える。しかしながら、現段階での擬似アスファルトの素材は、黒色のゴムと透明アクリルのみを利用し、さらに素材の切り出し方も非常に単純である。そのため、今回の実装で利用したゴムとアクリル板以外の素材を用いたり、異なる加工を施したりするなどといった、擬似アスファルトの高性能化が十分に検討されたとはいえない。また、今回の実験中には、水勢による素材片の飛び出しや配置の乱れなどが発生し、セルの明度に影響を与えていた事も確認されている。この問題

を解消するために、用いる素材や加工方法の工夫、素材片の固定方法の検討などが必要であると考えている。

8.3 アンビエントディスプレイとしての利用について

アンビエントディスプレイとして地面に埋め込み、雨天時の降水などを期待した場合には、その降水量に併せたシステムの再設計が必要になる。今回のシステムでは、ひとつのセルを乾燥状態から湿潤状態に変化させるために、1セルあたり約 90 ml の水を必要とした。現状のセルでは、極めて強い降水を受けた場合でも、乾燥状態のセルを湿潤状態に変化させるために 30 分以上の時間が必要となる計算である。このため、セルの深さを調整したり、擬似アスファルトの密度を高めるといった工夫で、湿潤状態へ移行させるために必要な水量を減らす必要がある。また実際に地面に埋め込み、その上を人が歩行する場合などを考え、ディスプレイ本体をアクリル以外の強度のある素材で実装し、耐久性を向上させなければならない。また現在、擬似アスファルトを構成する素材片はディスプレイに固定されておらず、不安定である。この点についても、今後改良する必要がある。

9. 関連研究

プロジェクトなどによる映像投影を用いずに、実際に実体を有する素材そのもの動きや変化を直接の描画に利用し情報を提示する手法がこれまでに提案されている。本章ではこれらの研究を概観し、提案システムを位置づける。

筧らの Shaboned Display [8] では、シャボン玉が持つ特性がシステムの入出力に適用されている。このディスプレイは、マトリクス状に並べられた噴出し口とエアポンプにより作られるシャボン玉の有無や大きさなどの組み合わせによってピクセルアートを描き出すものである。描画出力にシャボン玉の伸縮性が利用されているだけでなく、触れる事で容易く破裂するという性質がこのシステムへの入力として利用されている。それぞれのシャボン玉噴出し口に電極が設置され、電導性のあるシャボン玉があるときと、

