

# LEDパフォーマンスにおける 故障による違和感の定量化の検討

久保田 倉平<sup>1,a)</sup> 寺田 努<sup>1,b)</sup> 柳沢 豊<sup>2,c)</sup> 塚本 昌彦<sup>1,d)</sup>

**概要:** 近年 LED を用いたパフォーマンスが活発に利用されているがどうしても故障などのトラブルは避けられない。故障が起こると観客は間違っただけの光り方をしていないかと違和感を抱きパフォーマンスの魅力が落ちてしまうため、何かしらの対策が必要となる。そのひとつとして仮に故障が起こっても故障が起こっていることを観客に気付かせないようなシステム構築を行うことが挙げられる。違和感が定量化できれば、事前に違和感の小さくなるようなシステム構築を行うといった対策ができる。そこで本研究では、故障のばれにくいシステムを構築するため、故障により観客が抱く違和感を定量的に求める手法について検討した。まず、違和感の要因を調査するための実験を行い、結果から故障によりアニメーションの周期性が崩れることが違和感の要因のひとつであることがわかった。そこで周期性に着目し、LED パネルにおいて点灯パターンと故障パターンから違和感を推定できる特徴量を検討した。算出した特徴量は周期性を大きく崩すものと崩さないものの識別はできたが、違和感を推定できるほどの精度ではなく、今後さらに違和感の要因を明らかにする必要があることがわかった。

## 1. はじめに

LED を用いたエンタテインメントシステムは、アーティストのライブ演出を彩る電飾衣装や LED パネルを用いたステージパフォーマンス [1] や、無数の LED を用いて幻想的な世界を作り出すメディアアート [2] など観客の目を惹くような壮大な作品を中心に広く普及している。このようなウェアラブルコンピューティング技術やユビキタスコンピューティング技術を用いたエンタテインメントシステムである LED パフォーマンスは今後さらに活発に行われると考えられる。

ステージで使用する LED 装置や衣装を作る時には、その装置のもつ演出効果を最大限にすることと、装置の耐久性を高めるといふ、相反する二つの要素を満たすように常に要求される。例えば、ダンサーが着る服は、ダンスの動きを阻害しないように、軽く、小さく、動きやすく作る必要がある。一方で、電子基板や配線などの破壊を防ぐためには、頑丈に作らなければならない、もちろんそのように作

ろうとすると、衣装は大きくて重いものになってしまう。そこでステージ用の LED 装置は、演出の効果を最大にするために、こうした耐久性や安定性をやむなく犠牲にすることが多くなる。しかし、公演の最中にシステムが壊れて停止してしまい、観客にそれが明らかに見えてしまうと、観客は違和感を感じ興奮してしまう。観客が興奮することは、ライブやコンサートなどでは最も防ぎたいことのひとつであるため、これについては何らかの対策が必要になる。いくつかの方法があるが、そのひとつとして我々は「みかけディペンダビリティ」という概念を導入している [3]。みかけディペンダビリティとは、システムの作り方を工夫することで、システムに何らかの異常が生じた際の視覚的な演出効果の低下を防ぎ、観客に故障を気付かせないようにすることである。

これまででは、故障が起こった際に見た目の影響を小さくするような LED の配線を行うことでみかけディペンダビリティの確保を行ってきたが、その設計はクリエイターの勘や経験によるもので明確な設計指標となるものはなかった。ある LED パフォーマンスにおいて、想定している点灯パターンに対し考えられる故障パターンから、システムが故障した際に観客が抱く違和感を推定できれば、その違和感のより小さな点灯パターンや配線方法に変更することで、みかけディペンダビリティの高いシステムを作ることができる。

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kobe University

<sup>2</sup> m plus plus 株式会社  
m plus plus Co.,Ltd.

a) souhei-kubota@stu.kobe-u.ac.jp

b) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

c) kani@mplpl.com

d) tuka@kobe-u.ac.jp

そこで本研究では、みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標を確立するために、故障により観客が抱く違和感を定量的に求め、違和感を推定できるような特徴量の決定を目指す。違和感の要因を調査するため、LED パフォーマンスに用いられるシステムの基本となる形である LED をマトリクス状に配置したパネルを用いて、LED の故障と観客の抱く違和感の関係について実験を行う。その結果を分析し、LED パネルにおいて故障パターンから違和感を推定できる特徴量を検討する。

本論文は以下のように構成されている。2章で関連研究を紹介し、3章で違和感の定量化手法について述べる。4章で LED の故障と観客の抱く違和感との関係についての実験と考察について述べ、5章で違和感を推定できる特徴量について検討し、6章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

### 2.1 ディペンダビリティを確保したシステム

一般のコンピュータシステムにおいては、システムの機能を維持するようなディペンダビリティの確保を行ってきた。具体的には、元となるシステムの冗長化や多重化を行うことでトラブル発生時にはそのままサブシステムに切り替えて機能を提供することなどが挙げられる。このような冗長化や多重化の枠組みは広く知られており、メモリチップにおいて耐故障性を高める Chipkill[4] や半導体において耐故障性を高める NoC[5]、トラブルが大きな事故になりかねない自動車 [6]、医療機器 [7]、公共機器 [8]、人工衛星 [9] などで実際に用いられている。

しかし、ステージパフォーマンス等に用いるエンタテインメントシステムにおいては、システムの冗長化や多重化はユーザであるパフォーマの動きが抑制されるなどの問題があることから適していない。このようなシステムにおいては、故障が起こった際に機能をそのまま維持するのではなく、観客への効果に着目し、観客に故障を気付かせないシステム制御を行い、みかけディペンダビリティを確保することが重要である。

### 2.2 みかけディペンダビリティを確保したシステム

故障のばれにくさであるみかけディペンダビリティを確保したシステムとして、藤本らのダンスのステップに音の制御を割り当てることで効果音の出力や BGM の変更といった処理を行えるウェアラブルダンシング楽器システムが挙げられる [10]。このシステムでは認識エラーが起こった際にリズムにあったタイミングで何らかの音が再生されるようになっており、観客がエラーに気づかないような工夫が施されている。また、中田らは相互通信ではなくキャリブレーションにより点灯する LED ディスプレイを提案している [11]。このシステムでは赤外光により LED の点灯を制御することで通信トラブルを避けられ、うまくキャ

リブレーションできなかったデバイスはすべてオフにし異常な点灯を回避することで、トラブル時に観客が抱く違和感を小さくしている。寺田らはホストコンピュータがシステム障害により動作しなくなると、自動的に末端のセンサや表示機器が直接通信を行い、情報提示を継続するシステムを提案している [12, 13]。また、村尾らは装着型センサ管理デバイスを提案している [14]。この提案デバイスではセンサの故障や異常値の出力を検出した際に、あらかじめ学習したデータから値を補完することで、アプリケーションからはセンサが故障していないように見える。これらのシステムも多重化などの手法をとることなく見た目には故障していないように見えるため、みかけディペンダビリティの高いシステムであるといえる。

柳沢らは LED 衣装を用いた演出装置の信頼性の確保において次のような工夫を行っている。LED の配線について、関節などのよく曲がる部分に LED テープを直接配置すると、その部分の配線が破断しやすいため、関節の構造を考慮し、屈曲がおこらない部分に LED テープが配置されるようにしている [15]。また、一般に LED テープは、破断するとそれより先の LED に信号が届かなくなるといった特徴がある。もし LED テープを制御するラインがひとつしかなく、全ての LED がそのラインに接続されていたときに、LED の根本で破断が起きると、LED の大部分が制御不能となってしまふ。そのためあらかじめ制御ラインを複数に分けておくことで、ひとつのラインに破断がおきても、残りのラインにある LED は制御可能な状態を維持でき、見た目の影響を小さくできる。また、光らなくなる LED が衣装の一部分に固まっていると、その部位がまともって消えてしまい観客はその部位に何らかの異常が生じたことが伝わり、違和感を生じてしまう。そこで、ひとつのラインで点灯させる LED を複数の箇所分散させて配置することで、ラインのひとつに異常が生じてても、分散して LED が消灯するため故障をばれにくくできる。

このように従来は、故障が起こった際に見た目の影響を小さくするような LED の配線を行うことでみかけディペンダビリティの確保を行ってきたが、その設計はクリエイタの勘や経験によるもので明確な設計指標はなかった。そこで本研究では、みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標を確立するために、LED パネルを対象として故障により観客が抱く違和感を定量的に求め、違和感を推定できるような特徴量の決定を目指す。

## 3. 違和感の定量化手法

### 3.1 想定環境

実際のライブ演出では LED 衣装をはじめ、様々な LED システムが使用されているが、本研究では LED システムの基本となる形である LED をマトリクス状に配置したパネルを対象として考える。また、実際のライブ演出同様、

観客は薄暗い状況下で LED パフォーマンスを見ている環境を想定しており、この想定環境で故障が起こった際に観客が抱く違和感の要因は、複合的なものと考えられ、それぞれの要因を解決することでみかけディペンダビリティの高いシステムを構築できると考える。

### 3.2 違和感推定の手順

以下に違和感を推定する手順を述べる。

#### (1) 違和感の要因を調査

(a) 違和感の要因の候補をリストアップ：故障する LED の数、故障による周期性の変化、距離、アニメーションの速度、複数さ、etc...

(b) それぞれの要因と違和感との相関を調査（4章の実験）

#### (2) 違和感を推定できる特徴量 $\theta$ の算出

(a) (1) で特定した違和感の要因を数値化（=違和感を推定する特徴量  $\theta$ ）

(b) (1-b) の結果と  $\theta$  を比較して  $\theta$  が正しく違和感を推定できているか確認

本論文ではまず、故障する LED の数と故障による周期性の変化がどのように違和感と相関があるのかを調査するために 4 章で実験を行った。

### 3.3 応用先

違和感を推定できる特徴量がわかればみかけディペンダビリティの高いシステム構築のための設計指標を式として定式化できる。式に点灯パターンを情報を入力すると、故障した際に違和感を小さくできる配線パターンの候補が提示され、それを参考に配線を行うことで、みかけディペンダビリティの高いシステムを構築できると考えている。

## 4. 実験

みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標の確立には、点灯パターンと故障パターンから違和感を推定できるような特徴量を算出する必要がある。このような特徴量は、違和感の複数の要因から決定されると考えているため、実際の LED パネルに起こる故障を見た際の違和感の要因を明らかにする必要がある。本章では、実際の現場で特に使用頻度が高い LED パネルを対象として故障により観客が抱く違和感の要因を調べる実験を行った。

#### 4.1 調査項目

本研究で扱う「違和感」とは LED を用いたパフォーマンスにおいて観客がその光り方を見て、「壊れているのではないか」というように不自然に感じることである。そこで LED パネルにおいて故障が起こった際に観客が不自然に感じる傾向を調べることで、違和感の要因を調査する。ま

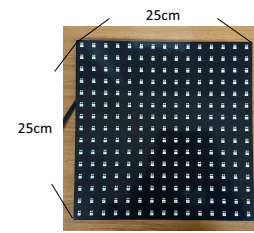


図 1 実験で用いた LED パネル

ず 3 章で挙げたように、違和感を抱く要因として、故障により消灯する LED の数や故障によってアニメーションの周期性が変化することなどが影響していると考えられる。そこで LED の数、周期性に着目し以下のことを調べることで、故障する LED 数の多さと周期性の変化が違和感の要因であるかを調査する。

- 故障する LED の数により観客が抱く違和感はどのように変化するのか。
- 故障によりアニメーションの周期性が変化することが違和感につながるのか。

#### 4.2 実験内容

縦 15 個 × 横 15 個の SK6812mini の LED をマトリクス状に配置した縦 25 cm × 横 25 cm の図 1 のような LED パネルを用いた。LED パネルは Arduino nano[16] を用いて PC 上で制御することで様々なアニメーションを表示させることができる。2 つの LED パネル上に点灯パターンが同じで故障パターンが異なるアニメーションを表示する。被験者には同時に 2 つのパネルを見せ、どちらが好みの光り方か選んでもらうというアンケート調査を実施した。被験者ごとの距離による違和感の差を生じさせないために、被験者には統一して LED パネルから 5 m 離れた位置からパネルを見てもらった。点灯パターンは、様々なアニメーションを構成する基本的な要素であるものとして、2 列の点灯 LED のラインが横移動するもの、縦移動するものの 2 パターンを用意した。ラインの移動は 0.3 s 間隔で、移動速度は 5.2 cm/s とし、光度 50 mcd の明るさで光らせ、暗い室内で行った。故障パターンは、配線の仕方や故障重度に応じて、次の 6 種類を用意した。

- 左から 6 列目の縦列に対し、縦に 1 列（15 個）故障
- 左から 6 列目の縦列に対し、縦に上から 7 個故障
- 左から 6 列目の縦列に対し、縦に上から 2 個故障
- 上から 6 列目の横列に対し、横に 1 列（15 個）故障
- 上から 6 列目の横列に対し、横に左から 7 個故障
- 上から 6 列目の横列に対し、横に左から 2 個故障

なお、本調査における故障は LED が光らないことを想定しており、故障パターンのアニメーションは故障箇所の LED を消灯することで実現した。例としてラインの横移動において縦に 7 個故障している場合のアニメーションを図 2 に示す。被験者は 20 代の男女 25 名である。なお、この実験

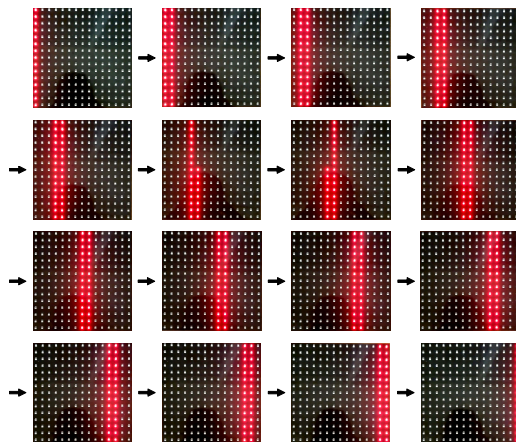


図 2 アニメーション例 (ラインの横移動において左から 6 列目の上から 7 個が故障)

表 1 実験 1 における比較組合せ

点灯パターン	故障パターン	
横移動	故障無し	縦に 1 列 (15 個)
	故障無し	縦に 7 個
	故障無し	縦に 2 個
	縦に 1 列 (15 個)	縦に 7 個
	縦に 1 列 (15 個)	縦に 2 個
	縦に 7 個	縦に 2 個
縦移動	故障無し	横に 1 列 (15 個)
	故障無し	横に 7 個
	故障無し	横に 2 個
	横に 1 列 (15 個)	横に 7 個
	横に 1 列 (15 個)	横に 2 個
	横に 7 個	横に 2 個

は神戸大学研究倫理審査委員会の承認を得て行った。

先ほど挙げた 2 項目について、比較する組合せを変えた 2 つの実験を行った。

#### 4.2.1 実験 1: 故障する LED の数と違和感の関係性の調査

故障する LED の数と違和感の関係性を調査するために、同じ点灯パターンにおいて故障する LED の列は同じで数が異なるもの同士を比較した。例えばラインの横移動において縦に 7 個故障と縦に 2 個故障を比較した。比較する組合せを表 1 に示す。

#### 4.2.2 実験 2: 故障による周期性の変化と違和感の関係性の調査

故障による周期性の変化と違和感の関係性を調査するために、同じ点灯パターンにおいて故障する LED の数は同じで故障箇所が異なるもの同士を比較した。例えばラインの横移動において縦に 7 個故障と横に 7 個故障を比較した。比較する組合せを表 2 に示す。

### 4.3 実験結果と考察

実験 1 の結果を表 3, 4 に、実験 2 の結果を表 5, 6 に示す。表は、行と列の交点に、行要素が列要素より好みであ

表 2 実験 2 における比較組合せ

点灯パターン	故障パターン	
	縦故障	横故障
横移動	縦に 1 列 (15 個)	横に 1 列 (15 個)
	縦に 7 個	横に 7 個
	縦に 2 個	横に 2 個
縦移動	縦に 1 列 (15 個)	横に 1 列 (15 個)
	縦に 7 個	横に 7 個
	縦に 2 個	横に 2 個

表 3 実験 1: 横移動における故障数の異なるもの同士の比較結果

縦故障	なし	1 列	7 個	2 個
故障無し	-	100	100	92
1 列故障	0	-	76	56
7 個故障	0	24	-	40
2 個故障	8	44	60	-

ると答えた被験者の割合を示しており、例えば実験 1 において横移動における縦 1 列故障と縦 7 個故障を比べると、縦 1 列故障の方が好みであると答えた割合は 76%であることがわかる。

まず、実験 1 の結果について考察する。表 3 より、ラインの横移動における縦故障について、故障無しは他のどの故障パターンと比較しても高い評価を得ており、被験者が故障により違和感を抱いていることがわかる。1 列故障について、7 個故障と比較すると特に高い評価を得ており 1 列故障の方が違和感が小さいことがわかるが、2 個故障と比較すると大きな差は生じなかった。また、7 個故障と 2 個故障の比較でも大きな差はなく、見る人に与える違和感の強さはほぼ同等であるといえる。表 4 より同様の関係性がラインの縦移動における横故障の結果についてもみられた。被験者からは、単純に 1 列故障の方が消灯している範囲が大きくて不自然に感じたという意見もあれば、1 列全ての LED が消灯していることより 7 個消灯している状態の方が消灯 LED と点灯 LED の境目がはっきりしているため消灯していることに気づきやすく不自然に感じたという意見が多かった。

以上より、本実験では故障する LED の数と違和感に直接的な関係性は見られず、別の要因が関係していると考えられる。

次に、実験 2 の結果について考察する。表 5 より、ラインの横移動に対してはどの故障パターンに対しても縦故障の方が低い評価であり、表 6 より、ラインの縦移動に対しては横故障の方が低い評価となっている。被験者からは、例えばラインの横移動における横故障のようにしばらくの間光らない LED がある状態にも違和感を感じたが、それ以上に横移動における縦故障のようにアニメーションの途中で一度に固まった範囲の LED が消えるなどの予想される動きではない光り方をしたことに違和感を抱いたという意見が多かった。



表 4 実験 1: 縦移動における故障数の異なるもの同士の比較結果

横故障	なし	1 列	7 個	2 個
故障無し	-	92	100	96
1 列故障	8	-	80	56
7 個故障	0	20	-	48
2 個故障	4	44	52	-

表 5 実験 2: 横移動における故障箇所が異なるもの同士の比較結果

	縦 1 列	横 1 列	縦 7 個	横 7 個	縦 2 個	横 2 個
縦 1 列	-	36	-	-	-	-
横 1 列	64	-	-	-	-	-
縦 7 個	-	-	-	28	-	-
横 7 個	-	-	72	-	-	-
縦 2 個	-	-	-	-	-	36
横 2 個	-	-	-	-	64	-

表 6 実験 2: 縦移動における故障箇所が異なるもの同士の比較結果

	縦 1 列	横 1 列	縦 7 個	横 7 個	縦 2 個	横 2 個
縦 1 列	-	60	-	-	-	-
横 1 列	40	-	-	-	-	-
縦 7 個	-	-	-	76	-	-
横 7 個	-	-	24	-	-	-
縦 2 個	-	-	-	-	-	68
横 2 個	-	-	-	-	32	-

つまり、しばらくの間不自然に光らない LED があることや、アニメーション中の周期性が崩れることは違和感を抱く要因のひとつであり、特に周期性が崩れることは強い違和感を与える可能性が高いと考えられる。横移動における縦 1 列故障と縦 7 個故障では縦 1 列故障の方がアニメーションの周期性を崩しているように思えるが、表 3 より 7 個故障より 1 列故障の方が高い評価を得ており、違和感が小さいことがわかる。先ほど挙げた被験者の意見のように消灯したことへの気づきやすさというのも違和感の感じ方に影響を与えていると考えられる。

#### 4.4 実験のまとめ

本実験では、LED パネルにおいて故障パターンの異なるアニメーション同士を比較することで観客が好まない光り方の傾向を調べ、違和感を抱く要因について調査した。実験結果より、故障する LED の数と違和感に直接的な関係性は見られなかった。また、故障によって観客が違和感を抱く要因のひとつとして、アニメーション中の周期性が崩れることが影響していることがわかった。したがって、周期性を崩さないような配線を行うことで、故障発生時の違和感を抑えることができると考えられる。

しかし、同じ故障パターンでも、複雑な点灯とシンプルな点灯に対しての故障では観客が抱く違和感は異なることや、アニメーションの速さや色による違いなど、正確に違和感を推定できる特徴量を算出するには本研究で調査した内容だけでは不十分であり、今後様々な点灯パターンと故障パターンを用いて実験を行い、違和感を抱

きやすい点灯パターンと故障パターンの組合せや、違和感を抱く他の要因についてさらに調査する必要がある。

## 5. 違和感推定のための特徴量の算出

本章では、みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標を確立する第一歩として、LED パネルを対象として点灯パターンと故障パターンから違和感を推定する特徴量  $\theta$  について述べる。

違和感の要因は複合的であると考えられるため、特徴量  $\theta$  は複数のパラメータから構成されると考えられる。今後、より詳細な実験を行い違和感を抱く他の要因を調査する必要があるが、4 章の実験より、故障によりアニメーションの周期性が崩れると観客は違和感を抱きやすいことがわかった。そこで周期性が崩れることが特徴量  $\theta$  に影響を与えていると考えられ、周期性に着目して算出した違和感を推定できる特徴量  $\theta$  について述べる。元の点灯パターンが持つアニメーションの周期と故障パターンの周期の差を特徴量  $\theta$  とし、 $\theta$  の値が大きいほど周期性が崩れた状態であり観客が抱く違和感も大きくなるのではないかと考えた。

### 5.1 算出方法

算出方法の流れを述べる。まず LED パネルの縦列横列に対し一列ごとに、点灯 LED を 1、消灯 LED を 0 とした数列を高速フーリエ変換 (FFT) し、パワースペクトルを求める。FFT を用いる場合はデータの個数を 2 の累乗にする必要があり、足りないデータは 0 で補完した。  $x$  を各列における LED の位置 (縦列に対しては上から  $x = 0$ 、横列に対しては左から  $x = 0$ )、 $f(x)$  を点灯状態、 $N$  を 1 列の LED の数、サンプリング周波数を  $1/N$ 、 $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$  とすると、ある 1 列におけるパワースペクトルの各周波数  $t/N$  における振幅  $A(t)$  は以下の (1) 式で表される。

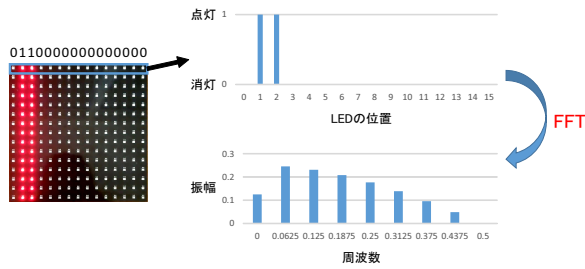
$$A(t) = \left| \left( \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-i \frac{2\pi t x}{N}} \right) / N \right| \quad (1)$$

そして、全ての縦列横列の周波数の振幅の合計値を、そのフレームの視覚情報における情報エントロピーと定義する。  $v, h$  をそれぞれパネルの縦列横列の位置 (パネル左端の列から  $v = 1$ 、上の列から  $h = 1$ ) とすると、全ての縦列、横列の振幅の合計値  $X_v, X_h$  はそれぞれ以下の (2), (3) 式で表される。そして、パネルの全ての縦列横列の振幅の合計値である情報エントロピー  $X_i$  を以下の (4) 式で定義した。

$$X_v = \sum_{v=1}^N \sum_{t=0}^{N-1} A_v(t) \quad (2)$$

$$X_h = \sum_{h=1}^N \sum_{t=0}^{N-1} A_h(t) \quad (3)$$

$$X_i = X_v + X_h \quad (4)$$



全ての縦列横列に対してFFTした周波数の振幅の合計値を**情報エントロピー**と定義。

図 3 情報エントロピーの定義

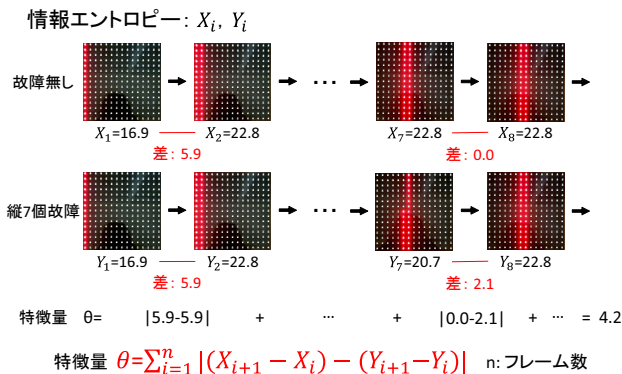


図 4 特数量の計算例

この情報エントロピーの各フレーム間での変化がそのアニメーションの周期性と関係していると考え、アニメーション中の各フレーム間の故障無しパターンと故障パターンの情報エントロピーの変化量の合計値を特数量  $\theta$  とした。  $n$  をアニメーションのフレーム数、  $X_i$  を故障無しの、  $Y_i$  を故障パターンの各フレームにおける情報エントロピーとすると、特数量  $\theta$  は以下の (5) 式で表される。

$$\theta = \sum_{i=1}^n |(X_{i+1} - X_i) - (Y_{i+1} - Y_i)| \quad (5)$$

情報エントロピーについて図 3 に示し、例としてラインの横移動における縦 7 個故障の特数量の算出を図 4 に示す。

## 5.2 考察

4 章の実験で用いた故障パターンの特数量  $\theta$  を 4.1 節の方法で算出し、周期性と比較したものを表 7 に示す。  $\theta$  の値をみると、周期性を崩さない故障パターン（横移動に対する横故障、縦移動に対する縦故障）の方が他の故障パターンと比べて  $\theta$  の値が小さく、周期性を大きく崩す故障パターン（横移動に対する縦 1 列故障、縦移動に対する横 1 列故障）の  $\theta$  の値が最大となっているといった関係性がみられ、周期性を大きく崩すものと崩さないものの識別はできると考えられる。

4 章の実験結果と特数量  $\theta$  を比較したものを表 8 に示す。例えば、ラインの横移動における縦 1 列故障と縦 7 個故障では 76% の割合で 1 列故障の方が好みであるという結果が

表 7 特数量  $\theta$  と実験で用いた故障パターンの周期性比較

	横移動		縦移動	
	周期性	特数量 $\theta$	周期性	特数量 $\theta$
縦 1 列 (15 個) 故障		11.8		0.1
縦 7 個故障	崩す	4.2	崩さない	1.1
縦 2 個故障		0.7		1.1
横 1 列 (15 個) 故障		0.1		11.8
横 7 個故障	崩さない	1.1	崩す	4.2
横 2 個故障		1.1		0.7

表 8 特数量  $\theta$  と実験結果 (好みであると答えた割合) 比較

	結果 (%)	故障パターン				
		縦 1 列	縦 7 個	縦 1 列	縦 2 個	
横移動	76	24	56	44	40	60
特数量 $\theta$	11.8	4.2	11.8	0.7	4.2	0.7

得られたが、縦 1 列故障の方が  $\theta$  の値が大きく、  $\theta$  の値が大きいほど違和感が大きくなるという仮説に反する結果となった。この特数量は故障する LED の数に依存している値であり、周期性を崩すパターンの中での違和感の差別化ができず、3 章の結果との相関性は小さかったため、この特数量から違和感を正確に推定することはできなかった。

より正確に違和感を推定できる特数量を算出するためには、様々な点灯パターンと故障パターンを用いて違和感を抱きやすい光り方を調査する実験を行い、違和感を抱く他の要因を明らかにし、それらを組み合わせた算出方法を追究する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、LED パネルにおいて故障が起こった際に観客が抱く違和感の要因を調査し、みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標を確立する第一歩として、点灯パターンと故障パターンから違和感を推定できる特数量について検討した。実験結果より、故障によりアニメーションの周期性が崩れることが違和感を抱く要因のひとつであり、周期性を崩さないような配線を行うことで故障発生時の違和感を抑えることができると考えられる。そこで周期性に着目し、特数量を求めたが違和感を正確に推定できる程の精度ではなかった。

みかけディペンダビリティの高いシステムを構築するための設計指標を確立するためには、違和感を抱きやすい点灯パターンと故障パターンの組合せや、違和感を抱く他の要因についてさらに調査する必要がある。例えば、同じ故障パターンでもアニメーションの速さや複雑さの違いによって違和感は異なると考えられることや、一度に複数のパネルを用いてパフォーマンスを行う際に 1 つのパネルだけ光らない、もしくは光っている状態だと強い違和感を抱きやすいと考えられ、そのような想定環境においても実験を行う予定である。今後正確に違和感を推定できる特数量の算出を目指し、それを用いて経験則ではわからなかった違和感を抑えられる配線方法についても検討していく。

謝辞 本研究は、JST, CREST, JPMJCR18A3 の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] SAMURIZE from EXILE TRIBE, 入手先 (<https://www.ldh.co.jp/management2/samurize/>).
- [2] teamLab, 入手先 (<https://www.team-lab.com/>).
- [3] 寺田 努: みかけディペンダビリティ: ウェアラブル・ユビキタスエンタテインメントシステムのための新たな評価軸の提案, 情報処理学会シンポジウムシリーズマルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2010) 論文集, pp. 1962–1967 (July 2010).
- [4] T. J. Dell: A White Paper on the Benefits of Chipkill-Correct ECC for PC Server Main Memory, *IBM Microelectronics Division*, pp. 1–23 (Nov. 1997).
- [5] M. Radetzki, C. Feng, X. Zhao, and A. Jantsch: Methods for fault tolerance in networks-on-chip, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 46, No. 1, pp. 8:1–8:38 (Oct. 2013).
- [6] 鎌田恵一: 鉄道車両用: 次世代伝送技術の国際規格化, 東芝レビュー, Vol. 64, No. 2, pp. 43–46 (Feb. 2009).
- [7] 小川建亜紀, 鈴木廣美: 信頼性工学からみた医療機器の故障対策の検討, 医科器械学, Vol. 76, No. 4, p. 264 (Apr. 2006).
- [8] 国藤隆氏, 早乙女弘, 糟谷直大: ネットワーク技術による省配線新連動システム (ネットワーク信号制御システム), 日立評論, Vol. 89, No. 11, pp. 844–847 (Nov. 2007).
- [9] 吉田 実: 宇宙システムのつくりかた : 3. 宇宙で動くソフトウェアのつくりかた -宇宙環境での信頼性の確保-, 情報処理, Vol. 56, No. 8, pp. 768–771 (July 2015).
- [10] 藤本 実, 藤田直生, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: ウェアラブルダンシング演奏システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 12, pp. 2900–2909 (Dec. 2009).
- [11] 中田真深, 児玉賢治, 藤田直生, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: プロジェクタによる一斉制御が可能なユビキタス光デバイスの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 12, pp. 2871–2880 (Dec. 2009).
- [12] 寺田 努, 柳沢 豊, 塚本昌彦, 武田誠二, 岸野泰恵, 須山敬之: 装着デバイス間の直接通信によるウェアラブルコンピューティングの信頼性確保手法について, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-UBI-32, No. 8, pp. 1–8 (Nov. 2011).
- [13] 武田誠二, 岸野泰恵, 柳沢 豊, 須山敬之, 寺田 努, 塚本昌彦: ウェアラブルコンピューティングのディペンダビリティを確保する情報変換機構をもつ装着型入出力デバイスの設計と実装, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-UBI-32, No. 9, pp. 1–8 (Nov. 2011).
- [14] 村尾和哉, 竹川佳成, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティングのためのセンサ管理デバイスの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 9, pp. 3327–3339 (Sep. 2008).
- [15] 柳沢 豊, 藤本 実: LED 衣装システムの演出装置としてのディペンダビリティについて, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-GN-100, No. 18, pp. 1–7 (Jan. 2017).
- [16] Arduino, 入手先 (<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>).