The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | ユビキタス環境におけるアート表現のための電飾制御方式に関する研究 |
| Author(s) | 細見, 心一 |
| Citation | 大阪大学, 2008, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/23462 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士12763

# ユビキタス環境における
# アート表現のための電飾制御方式に関する研究

2008年1月

細見　心一

# ユビキタス環境における
# アート表現のための電飾制御方式に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　2008年1月

細見　心一

# 関連発表論文

## 1. 学会論文誌発表論文

1. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ユビキタス環境におけるLED明滅プログラミング方式, 電子情報通信学会和文論文誌D, Vol. J90-D, No. 6, pp. 1367-1374 (June 2007).

2. 細見心一, 内田直子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションのための明滅型光源の感性評価，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol. 9, No. 3, pp. 297-304 (Aug. 2007).

3. 細見心一, 山本真史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションにおけるLED明滅パターン作成・再生のための制御システム，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol. 9, No. 3, pp. 335-342 (Aug. 2007).

## 2. 研究会等発表論文（査読付）

1. 牧成一, 藤本実, 花岡邦俊, 沖野将司, 池田朋大, 岡田量太, 細見心一, 中田眞城子, 塚本昌彦: 神戸イルミネプロジェクト：LEDを使ったブレイクダンスパフォーマンス, マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム(DICOMO2007)論文集，Vol. 2007, No. 1, pp. 1207-1214 (July 2007).

2. 所洋平, 村松邦彦, 細見心一, 塚本 昌彦: ウェアラブルコンピューティングのための２つの加速度センサを用いたポインティング方式, マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム(DICOMO2007)論文集，Vol. 2007, No. 1, pp. 1215-1222 (July 2007).

3. S. Hosomi, M. Tsukamoto, and S. Nishio: Cooperation of LED Control Chips in Ubiquitous Environment, In *Proceeding of IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2007)*, pp. 249–254 (July 2007).

4. S. Hosomi, M. Tsukamoto, and S. Nishio: A System for Controlling LED Blink in Wearable Fashion, In *Proceeding of International Wireless Communication and*

*Mobile Computing Conference (IWCMC 2007)*, pp. 665–670 (Aug. 2007).

## 3. その他の研究会等発表論文

1. 細見心一, 内田直子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 衣服とLEDの感性評価に関する研究に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 2, pp. 1-6 (June 2005).

2. 細見心一, 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションのための1/fゆらぎの感性評価実験に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 3, pp. 7-14 (Dec. 2005).

3. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ユビキタス環境におけるLED明滅の連携動作記述方式, 情報処理学会研究報告 (モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 2006-MBL-39), pp. 103-110 (Nov. 2006).

4. 中田眞深, 児玉賢治, 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦, 細見心一, 西尾章治郎: ユビキタス光チップ: 光通信による大量LEDの一斉制御のための小型デバイス, ウェアラブル・ユビキタスワークショップ in 神戸, pp. 9 (Dec. 2007).

5. 武田淳佑, 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦, 細見心一, 西尾章治郎: ユビキタス音チップ: 音の認識と出力を行う小型デバイス, ウェアラブル・ユビキタスワークショップ in 神戸, pp. 10 (Dec. 2007).

6. 久保建太, 細見心一, 竹川佳成, 塚本昌彦, 寺田努, 西尾章治郎: ユビキタス振動チップ: 振動の入出力を行う小型デバイス, ウェアラブル・ユビキタスワークショップ in 神戸, pp. 11 (Dec. 2007).

7. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 電飾ブレイクダンスのためのインクリメンタルプログラミング, ウェアラブル・ユビキタスワークショップ in 神戸, pp. 36 (Dec. 2007).

# 4. デモ・展示

1. 細見心一, 大江瑞子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 第114回上田学園コレクション–○爛漫, デモ・出展 (Jan. 2005).

2. 細見心一, 大江瑞子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 御堂筋パレード2005–世界をつなごう!御堂筋パレード, デモ・出展 (Oct. 2005).

3. 細見心一, 大江瑞子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピュータショー in KANSAI（共催：ISWC2005), デモ・出展 (Oct. 2005).

4. 細見心一, 大江瑞子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: WMTE2005–バンケット, デモ・出展 (Nov. 2005).

5. 細見心一, 大江瑞子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 第116回上田学園コレクション–LIFE, デモ・出展 (Jan. 2006).

6. S. Hosomi, T. Yoshihisa, M. Oe, M. Tsukamoto: 1/f Yuragi Lantern, ACM International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE ' 06) Art Works: Leonardo (June 2006).

7. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 第1回NPO法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構　交流会, 講演, 摩耶イルミネプロジェクト（7/29, 8/5）の紹介 (Aug. 2006).

8. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 第2回　星と光の祭典, デモ・出展 (Aug. 2006).

9. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 夏のビッグイベント2006, デモ・作品出展 (Aug. 2006).

10. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: KOBEルミナリエイベントステージ, デモ・出展 (Dec. 2006).

11. 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: KOBEルミナリエイベントステージ, デモ・出展 (Dec. 2007).

以上

# 内容梗概

近年，LEDを中心とした電飾産業が急速に発展し，街角や店頭での電灯を用いた装飾が普及してきた．また，LEDを用いた電飾アクセサリ，イルミネーション付き携帯電話などLEDのファッション的活用が注目されている．今後，エレクトロニクス技術の発展に伴い，電灯を用いた装飾はアート分野を中心に新しい応用が提案され，ユビキタスコンピューティングのキラーコンテンツとなる可能性を持っている．例えば，LEDを服に埋め込み動的に制御するファッション，パーティやコンサート会場での電飾を使ったパフォーマンス，そして空間に配置した複数のLEDを連携させたイルミネーション等が可能となる．これらは場の雰囲気に合った明滅を表現することが重要となるが，LEDを使ったファッションの場合，明滅の心理的効果が未知であるため，ファッションとしての有効性が不明確であるという問題がある．また，明滅の表現力を向上させるためには，技術者および非技術者を含む様々な分野の人間が明滅の設計と細かい編集作業をストレスなく行えることが重要となる．しかし，従来のプログラミング言語では直観的な明滅設計ができず，簡単なツールでは細かい編集が難しいため，設計者の負荷が問題となる．さらに，複数のLEDを同期させたりタイミングをずらすといった様々な連携を実現する場合，個々のLEDの動作を設計する必要があり，制作者に負担となるという問題がある．

この問題に対し，ユビキタスコンピューティング環境における電飾の明滅について，その表現力を向上させるために，LED制御方式について研究を進めてきた．研究成果は，アート分野における電飾産業の発展に貢献するものであり，本論文はその研究成果をまとめたものである．

本論文は5章で構成され，その内容は次の通りである．まず，第1章で序論を述べ，第2章において，明滅光源のファッションとしての可能性に着目し，衣服と明滅を組み合わせた感性評価実験について述べる．明滅を利用したファッションは，TPOに合った服装があるように，衣服に合う明滅表現をデザインすることが重要となる．しかし，明滅表現のファッションとしての効果に関する知見はこれまで得られていない．そこで，衣服と明滅を組み合わせた感性評価実験を行い，衣服と明滅表現の関係について考察する．

次に，第3章では，単独の小型LED制御デバイスの直観的な明滅設計を実現する明滅制御システムについて述べる．アート表現のための明滅は，試行を繰り返すことでより良いパターンに仕上げていく．しかし，従来のプログラミング言語は抽象度が低いため，明

滅表現との間に隔たりがあり非技術者には使いにくい．一方，演出パターンの再生やテンポのアップダウンを制御するツールは，誰でも簡単に利用することができるが，アート表現に求められる複雑な表現や輝度やテンポの細かい調整が困難である．そこで，本章では，明滅設計に適したプログラミング方式を提案し，単独の小型LED制御デバイスとPCを組み合わせた明滅制御システムを構築する．これにより，明滅パターンの細かい編集を繰り返すことが容易になり，ユーザが意図した明滅パターンを実現しやすくする．

第4章では，複数の小型LED制御デバイスの迅速な明滅設計を実現する明滅連携作成方式について述べる．第3章で，単独の小型LED制御デバイスの明滅設計に適したプログラミング方式を提案した．しかし，複数の小型LED制御デバイスの連携では，個々のデバイスで動作が異なるため，試行段階ごとに個々のデバイスの動作を書換える必要があり，大量のLEDを制御する場合にこの作業は設計者に大きな負担となる．そこで，小型LED制御デバイスの明滅連携作成方式を提案する．これにより，複数の小型LED制御デバイスの動作を，迅速に編集することが可能になり，明滅設計者の負荷を軽減する．

最後に第5章では，本論文の成果を要約したのち，今後の検討課題について述べ，本論文のまとめとする．

# 目 次

**1 序章** **1**

1.1 研究の背景 . . . . . 1

1.2 本研究の目的 . . . . . 4

1.3 本論文の構成 . . . . . 5

**2 衣服における明滅光源の感性評価** **9**

2.1 まえがき . . . . . 9

2.2 関連研究 . . . . . 10

2.3 実験概要 . . . . . 10

2.3.1 衣服の種類 . . . . . 12

2.3.2 明滅パターンの種類 . . . . . 13

2.3.3 評価用語の種類 . . . . . 14

2.3.4 実験手順 . . . . . 16

2.4 実験結果 . . . . . 17

2.5 考察 . . . . . 21

2.5.1 フォーマル性と装飾性 . . . . . 21

2.5.2 衣服と明滅の相乗効果 . . . . . 22

2.6 むすび . . . . . 27

**3 明滅制御システム** **29**

3.1 まえがき . . . . . 29

3.2 要求事項 . . . . . 30

3.2.1 直観的な明滅設計方式 . . . . . 30

3.2.2 明滅パターンの圧縮 . . . . . 31
3.2.3 明滅パターン開発環境 . . . . . 32
3.3 設計 . . . . . 33
3.3.1 直観的な明滅設計方式 . . . . . 33
3.3.2 圧縮方式 . . . . . 35
3.3.3 小型LED制御デバイス . . . . . 39
3.4 実装 . . . . . 40
3.5 評価 . . . . . 44
3.5.1 インタフェースの評価実験 . . . . . 44
3.5.2 圧縮率の比較 . . . . . 46
3.5.3 実運用評価 . . . . . 48
3.6 関連研究 . . . . . 54
3.7 むすび . . . . . 56

**4 明滅連携作成方式 57**
4.1 まえがき . . . . . 57
4.2 要求事項 . . . . . 58
4.3 設計 . . . . . 60
4.3.1 PC上でのインクリメンタルプログラミング . . . . . 61
4.3.2 小型LED制御デバイス上での差分更新 . . . . . 62
4.4 実装 . . . . . 68
4.4.1 全体構成 . . . . . 68
4.4.2 小型LED制御デバイス . . . . . 69
4.4.3 PC上のエディタ . . . . . 72
4.5 評価 . . . . . 73
4.6 関連研究 . . . . . 77
4.7 むすび . . . . . 78

**5 結論 79**
5.1 本論文のまとめ . . . . . 79
5.2 検討課題 . . . . . 80

**謝辞** **87**

# 第1章

# 序章

## 1.1 研究の背景

1946年のコンピュータ誕生から現在に至るまで，コンピュータのサイズが変わるたびに，その用途が変化してきた．1950，60年代には部屋全体を占める巨大なコンピュータが軍事・科学技術計算に使われていた．1970，80年代には机上に置けるサイズのコンピュータが企業会計や文書作成に使われるようになった．1990年代になると，モバイルコンピュータが出現し，WWW，メール，プレゼンなどの個人タスクに主として使われるようになった．1990年代後半から2000年代にはコンピュータはさらに小型になり，携帯電話，iPodをはじめとする音楽プレーヤー，デジカメのような特定用途に使われるようになった．これらの小型コンピュータは，占いやミニゲームなどの暇つぶしやコミュニケーション，音楽や映像のようなエンタテイメントといった新しい分野を誕生させた．このように，これまでコンピュータのサイズが変わるたびに，それまでには考えられないような新しい用途が出現し，新しい産業，ビジネスが立ち上がっている [70]．近年では，コンピュータや半導体，センサなどの小型化により，いつでもどこでもコンピュータを利用できるユビキタス環境が実現しつつある．ユビキタス環境は，生活や社会の至るところにコンピュータが存在し，コンピュータ同士が自律的に連携して動作することにより，人間の生活を強力にバックアップする情報環境である [74]．机や椅子，床や壁といったものにデバイスを埋め込み，ユーザの状況をセンシングすることで様々なサービスを提供するユビキタス環境を実現するための研究が数多く行われている [1, 6, 41, 57]．今後，コンピュータは豆粒大・ゴマ粒大まで小さくなり [34]，新しい用途が提案されていくと予想される．

図 1.1: 衣服に LED を取り付けたファッション

一方，近年，LED を中心とした電飾産業が急速に発展してきた．1879 年に白熱電球がエジソンによって発明された．そして 1960 年代に赤色と黄緑色の LED（Light Emitting Diode）が開発され，1970 年代に黄色，1993 年に青色ダイオード，1996 年に青色 LED と蛍光体の組み合わせにより白色が開発された [59]．2005 年の日本における LED 生産量は約 109 億個，総額約 1,469 億円分である [69]．LED は白熱電球と比較して，消費電力が小さい，寿命が長い，色の種類が豊富，熱が発生しにくいという特徴を持つ [9]．このことから，LED は街角や店頭での装飾に利用されている．また，熱が発生しにくく，マイコンで容易に制御可能であることから，電飾アクセサリや LED ベルトバックルのようなファッション的活用が注目されている．このような電灯を用いた装飾は，エレクトロニクス技術の発展に伴いアート分野を中心に新しい応用が展開されると考えられる．電灯を用いた装飾の新しい応用を以下に示す．

- **電飾ファッション**

  従来から衣服のデザインに光を利用したものとしてスパンコールなどがあるが，LED をアクセサリや衣服に埋め込み明滅を制御することで，制作者オリジナルの動的な表現が可能となる（図 1.1）．明滅を制御する電子機器を組み込んだファッションは，ウェアラブルコンピュータの国際学会である IEEE International Symposium on Wearable Computers（ISWC2005）でのファッションショーで紹介されるなど，学術的にも注目を集めている．また，携帯ミュージックプレイヤーの音と光を同期させて雰囲気を

図 1.2: LED の光をダイレクトに利用したダンスパフォーマンス

盛り上げる携帯ストラップ等のファッションアイテムが考えられる．本研究では，電子機器で制御される明滅を衣服のデザインとしたファッションを電飾ファッションとする．

- **電飾パフォーマンス**

  従来から，光はパフォーマンスを盛り上げるための照明として演出に利用されているが，複数の LED を様々な物や場所に配置し連携させることで，光による視覚効果を強調したパフォーマンスを提案することができる．例えば，ダンサーに LED を付け，動作と明滅を同期させることにより，ファイヤーダンスのような光を操るダンスパフォーマンスが可能となる（図 1.2）．また，コンサート会場にて，ステージに立つパフォーマの衣服に付いた LED と，客席のペンライトの光を同期させることにより，会場全体で一体感を生む演出が可能となる．他に，ウェディングパーティー会場で，ドレスに付いた LED とテーブル上のインテリアに付いた LED を同期させ，キャンドルサービスの代わりに LED の光を利用する演出が可能となる．

- **イルミネーションの連携**

  従来のクリスマスツリーや街角のイルミネーションは単純な動作を繰り返すものが多いが，複数の LED を繊細に連携させることで，より豊かな表現力とオリジナリティを持つアート作品を実現できる．例えば，街角のイルミネーションにおいて，その場

にいる人々のアクセサリを連携させ，ゲートを通った人から順にアクセサリが明滅したり，来場者の歩調に合わせて周囲のイルミネーションが明滅するなど，人とのインタラクションによる多彩なイルミネーションが可能になる．また京都嵐山花灯路では歩道の脇に約2500個の提灯を設置しているが，これらの提灯を来場者の歩調と連携させることで，より情緒的な演出が可能になると考えらえる．

これまで，携帯電話のキラーコンテンツがゲームや着うたといったエンタテイメント分野での活用であったように [27, 37, 60]，電灯を用いた装飾のエンタテイメント分野での活用はこれからのユビキタスコンピューティングのキラーコンテンツになる可能性がある．ここで，電灯を用いた装飾がキラーコンテンツとなるためには，明滅表現をより豊かにしてコンテンツを強化することが重要と考えられる．

## 1.2 本研究の目的

前節で述べたようなアート分野における電飾応用では，その表現力を高めるために，より豊かな明滅を表現することが重要となる．アート表現に求められる明滅設計の過程を図1.3に示す．まず，電飾のイメージを頭の中で作りあげ，そのイメージを元に設計，編集，評価を繰り返し，より豊かな明滅を実現する．しかし，より豊かな明滅表現を実現するためには以下のような問題がある．

- **明滅の有効性**

  新しい電飾応用の場合，明滅の心理的な効果に関する知見を体系的に構築することが必要になる．例えば，電飾ファッションの場合，服の種類に合う明滅を選択してデザインすることが重要となる．しかし，電飾をファッションとして利用した場合の心理的効果が未知であるため，衣服に合った明滅表現がデザインしにくいという問題がある．

- **明滅の設計**

  より豊かな明滅表現を実現するためには，技術者だけでなく非技術者を含んだ様々な分野の人間が明滅の設計と細かい編集作業を行い，試行錯誤しながら表現力を向上させることが重要である．しかし，従来のC言語などのプログラミング言語は抽象度が低いため，使い慣れた人は複雑なパターンを設計できるが，プログラミング知識を

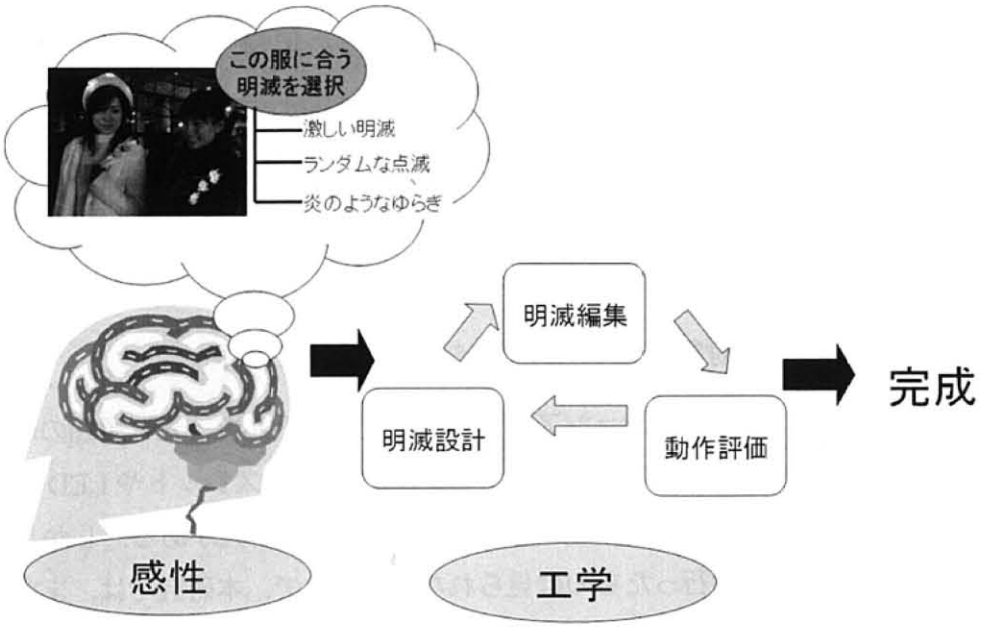


図 1.3: アート表現に求められる明滅設計のプロセス

持たない人にとっては明滅表現との間に隔たりがあり敷居が高い．一方，店舗や家庭での固定型調光システムで見られるような演出パターンの再生やテンポのアップダウンを制御する簡単なツールは，誰にでも利用可能であるという利点があるが，複雑な表現や細かい編集が困難である．さらに，複数のデバイスを連携させて複雑なアート表現を実現する場合，デバイスごとに異なる動作を実装する必要があるため，実装に時間がかかり制作者に負荷がかかるという問題がある．

本研究では，ユビキタスコンピューティング環境における明滅の創作活動を感性と工学の観点から支援するために，ファッションとしての有効性を調べる感性評価と，明滅設計者の負荷を軽減する明滅制御方式の実現を目的とする．

## 1.3 本論文の構成

本研究では，前節で述べた目的を達成するため，感性評価実験を実施し，さらに単独デバイスおよび複数デバイスにおける明滅制御方式を提案する．

- **衣服における明滅光源の感性評価（第2章）**

  電飾をファッションとして利用した場合の心理的効果が未知であるため，衣服に合った明滅表現がデザインしにくい．これまで，衣服の感性評価と明滅の感性評価を単独で行ったものはあるが，衣服と明滅の組み合わせについて感性評価した研究は見当たらない．そこで，衣服と明滅を組み合わせた感性評価実験を行い，その関係について考察する．

- **単独デバイスを対象とした明滅制御システム（第3章）**

  LEDを利用したファッションアイテムの関連研究として，光と周囲の環境とのインタラクションに関する研究 [4, 33, 42, 58]，LEDブレスレットやLEDマトリックスTシャツを簡単に構築できる構築キット [7] に関する研究がある．しかし，その明滅表現について研究を行ったものは見られない．そこで，本研究では，まず単独のデバイスを対象とした明滅制御システムを構築する．本システムでは，明滅設計に特化したインクリメンタルプログラミング方式と，より長い明滅パターンを表現するための明滅パターン圧縮方式を実現する．これにより，長時間の明滅パターンに対して細かい編集を繰り返すことが容易になり，ユーザが意図した明滅表現を実現しやすくする．

- **複数デバイスを対象とした明滅連携作成方式（第4章）**

  上記の明滅設計に特化したプログラミング方式の実現により，単独デバイスの明滅設計が実現しやすくなる．しかし，複数のデバイスを連携させる場合，個々のデバイスの動作を書換える必要があり，連携させる個数が増加するにつれ，明滅設計者への負荷は増大する．そこで，インクリメンタルプログラミングによる明滅連携作成方式を提案する．これにより，複数デバイスの連携動作を迅速に書換えることが可能となり，明滅設計者の負荷を軽減できる．

本論文は5章から構成され，その内容は次の通りである．まず，第2章では，明滅型光源のファッションとしての可能性に着目し，衣服と明滅を組み合わせた感性評価実験について述べる．第3章では，単独デバイスのより豊かな明滅表現を実現する明滅制御システムについて述べ，第4章では，複数デバイスの明滅連携作成方式について述べる．最後に第5章では，本研究の成果を要約したのち，今後の研究課題について述べ，本論文のまとめとする．

なお，第 2 章は，文献 [18, 22, 23] で公表した結果に基づき論述する．第 3 章は，文献 [19, 21, 51] で公表した結果に基づき論述し，第 4 章は，文献 [17, 20, 24] で公表した結果に基づき論述する．

# 第2章

# 衣服における明滅光源の感性評価

## 2.1 まえがき

電飾ファッションは，外部への情報提示インタフェースとして利用でき，明滅の動的な制御により被服の表現を大幅に高めるポテンシャルを持つ．被服心理学の観点から電飾ファッションを見た場合，社会・心理学的目的からの着用が考えられる．被服心理学の分野では，人が被服を着用する目的を「生理的目的」と「社会・心理学的目的」の2つに区別している [66]．前者の生理的目的は，皮膚の保護，体温調節，運動促進などであり，身体内部の生理的平衡状態を保ち，生命維持と健康増進を志向したものである．後者の社会・心理学的目的は，自己表示・性的魅力の増大，流行，礼儀，慣習，規則などに基づいたものであり，内的な効果と外的な効果に区別される．内的な効果は，化粧，ネイルアート，刺青のように，自己の確認や強化，そして新しいファッションの創造の楽しみなどが挙げられる．外的な効果は，結婚式・披露宴・喪服・面接におけるスーツなど，被服自体が持つ他者に伝わるイメージである．また，外的な効果は，TPOのように着装行動について人々が共有している暗黙の社会的な着装規範が存在する．電飾ファッションは，この着装規範において，センサなどで周囲の状況を把握しTPOに応じて表現を変えることが可能となる．

しかし，電飾ファッションの外的な効果について，心理学的な知見は不足している．そのため，電飾ファッションは衣服に合う明滅パターンがイメージしにくく，そのファッション性を十分に表現できていないという問題がある．被服心理学分野および照明色彩学分野において，衣服と明滅それぞれについて感性評価を行ったものは多く見られるが，衣服と明滅の組み合わせについて系統的に述べられたものはない．衣服と明滅の組み合わせにつ

いて感性的研究を行うことは，電飾ファッションにおける社会的着装規範の発見と，そのデザインの可能性を広げる助けになると考えられる．そこで，本研究では，衣服と明滅の印象に関する基礎的な評価実験を行う．

以下では，第2.2節で関連研究について紹介し，第2.3節で実験概要について説明する．第2.4節では，実験結果を示し，第2.5節で実験結果の考察を行う．最後に第2.6節で本章のまとめを行う．

## 2.2 関連研究

計算機の小型化，高速な無線通信網の発達によって，コンピュータを身につけるウェアラブルコンピューティングが注目され，その環境も実現されつつある [46]．ウェアラブルコンピューティングは常に身につけるという特徴から，ファッションとしての可能性に関する研究 [29, 72] がある．

衣服の感性評価に関する研究は，被服心理学の分野において，生地の色を分析した表面色の感情効果に関する研究 [30, 31, 35] や，衣服のデザインに関する研究 [11, 15, 26, 73, 76] がある．一方，明滅の感性評価に関する研究については，色彩学の分野において，スクリーンやモニタ上の光色刺激に関する研究 [62, 64] や，都市景観照明の感情効果に関する研究 [68]，$1/f$ ゆらぎを持つ明滅に関する研究 [25] などがある．このように衣服と明滅，それぞれについての感性的研究は多く蓄積され，デザイン等の分野で活用されているが，その組み合わせについて系統的に述べた研究はみられない．

ヒューマンインタフェースの分野では，感性評価により，印象派の絵画のパレットカラーを抽出し，色彩デザインなどへの再利用へ向けた研究 [13] があり，感性評価により得られた知見がデザインに活用されている．

## 2.3 実験概要

本研究では，衣服と明滅を組み合わせた印象について調べるため，7段階尺度のSD(Semantic Differential) 法を用いた評価実験を行った．SD法とは，印象評価を数値化する統計的手法で，被験者に刺激を与えて，対極にある感情表現の対によって測定を行い，その結果について因子分析を行うことで，内包的性質を発見する手法である [32]．今回の実験では，モニタに衣服のデザイン画と左胸の位置に明滅型光源を表示した（図2.1）．実際のLEDを用

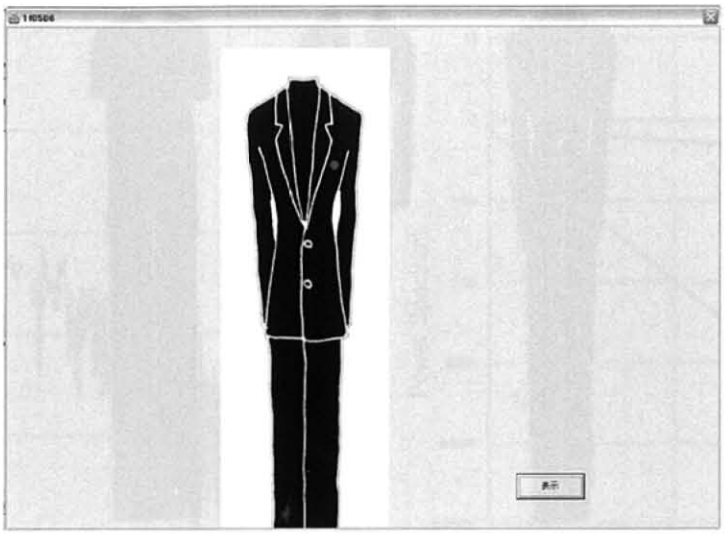

図 2.1: 実験に用いた画面

いなかった理由は，衣服の流行，場の印象，LED の形状など，感性評価に影響を与える要因を減らし，被験者に衣服のデザインと明滅の関係のみに着目させ，再現性の高い結果を抽出するためである．流行とは新しい思考や行動の様式が社会やメンバーに採用され普及していく過程であり，その結果一定の規模となった一時的な集合現象 [36] と定義され，心理学や社会心理学，社会学の分野で研究されている．従来の感性評価実験では，被験者が一般的に既知の評価対象物について実験を行ってきたが，LED の付いた服は新しい評価対象物であるため，被験者の認知度により印象に大きな個人差が出ると考えられる．本研究ではデザイン画を用いることで，衣服の素材や流行色から受ける印象をできるだけ排除する．衣服の感性評価には背景や空間の印象が大きく影響することがわかっている [71]．本研究ではモニタで実験を行うことで，空間の印象を排除する．LED は形状，大きさなど多くの種類が存在し一般的な基準がなく，樹脂加工による光の拡散により多様な表現方法が考えられる．光の印象に関する先行研究 [62, 64, 68] ではモニタを使い光の印象評価実験を行っており，建築分野では，モニタによるライティングのシミュレーションが実際に利用されている [54] ことから，モニタによる実験の有効性は十分であると考える．

実験は，健常な神戸大学工学部の 20 代の日本人学生 20 人（男性 15 人，女性 5 人）に対し行った．ヒューマンインタフェース分野の感性評価実験では 23 人の被験者に実験を行っ

図 2.2: 実験に用いた衣服のシルエット（左からスーツ，パーカー，Tシャツ）

た研究 [13] があり，今回の実験における被験者の数を 20 人とした．被験者全員に実験の目的および方法を十分に説明し，部屋が十分に明るい状態で，17 インチのフラットモニタを使い，モニタから約 50cm の距離で，被験者全員同じ条件のもと実験を行った．実験は 2005 年 7 月の昼間に行った．実験に用いた衣服，明滅パターン，評価用語，実験手順について，次に説明する．

### 2.3.1 衣服の種類

衣服は，紳士服，婦人服，子ども服，幼児服などのほか，用途によってもフォーマルウェア，スポーツウェアなど多くの種類が存在する．これまで被服心理学の分野では，婦人服についての研究が多く蓄積されており，衣服のデザインに関する因子分析結果 [71] から，衣服はフォーマルとカジュアル，派手と地味の 2 軸に分類できることがわかっている．そこで，フォーマルであるスーツ，カジュアルであるTシャツ，その中間であるパーカーの 3 つのデザイン画を実験に用いた．衣服の印象は，配色が影響してくるため，図 2.2 のように，シンボリックなスーツ，パーカー，Tシャツのシルエットを実験に用いた．

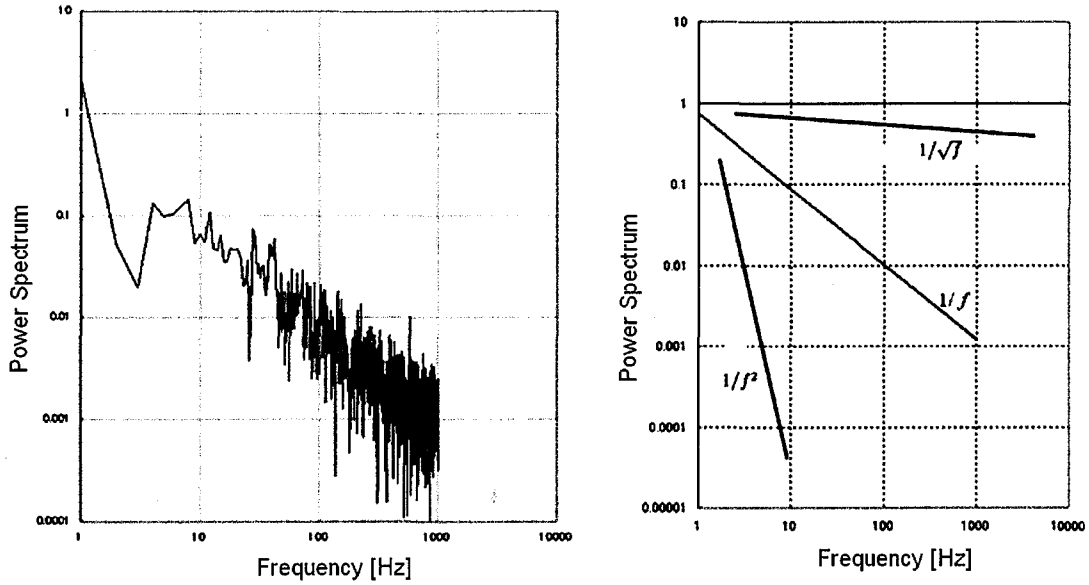


図 2.3: $1/f^n$ モデル

### 2.3.2 明滅パターンの種類

本研究では，感性評価に影響を与える要因を限定するため，明滅させる位置を左胸，明滅の色を赤，緑，青の 3 原色，明滅のパターンを 1 秒点滅，2 秒点滅，3 秒点滅の規則的な 3 パターン，$1/\sqrt{f}$ ゆらぎ，$1/f$ ゆらぎ，$1/f^2$ ゆらぎの 3 パターンとし，評価実験を行った．明滅させる箇所を左胸とした理由は，T シャツのロゴや制服の紋章の多くが，左胸についているからである．連続的かつ情緒的な明滅に関する影響を調べるため，$1/\sqrt{f}$ ゆらぎ，$1/f$ ゆらぎ，$1/f^2$ ゆらぎを実験に用いた．$1/f$ ゆらぎとは，ある事象のパワースペクトル分布が周波数と逆比例関係にあるもの（図 2.3）をいう．物理学の世界では，武者らの研究グループ [56, 77] が，電気回路の発振現象，道路交通状況，音楽（音），絵画（色）あるいは心電図などを対象としたスペクトル解析を実施し，原子・電子のミクロな世界からマクロな宇宙には，共通かつ普遍的に存在する $1/f$ ゆらぎが存在することを見出している [25]．この $1/f$ ゆらぎや $1/f^2$ ゆらぎはろうそくや蛍の光などにも見られ，何らかの心理的影響があると考えられている．パワースペクトル分布と周波数の傾きが 0 に近い程，ホワイトノイズと呼ばれる周波数に無関係なゆらぎとなり，この傾きが大きい程，ある周波数

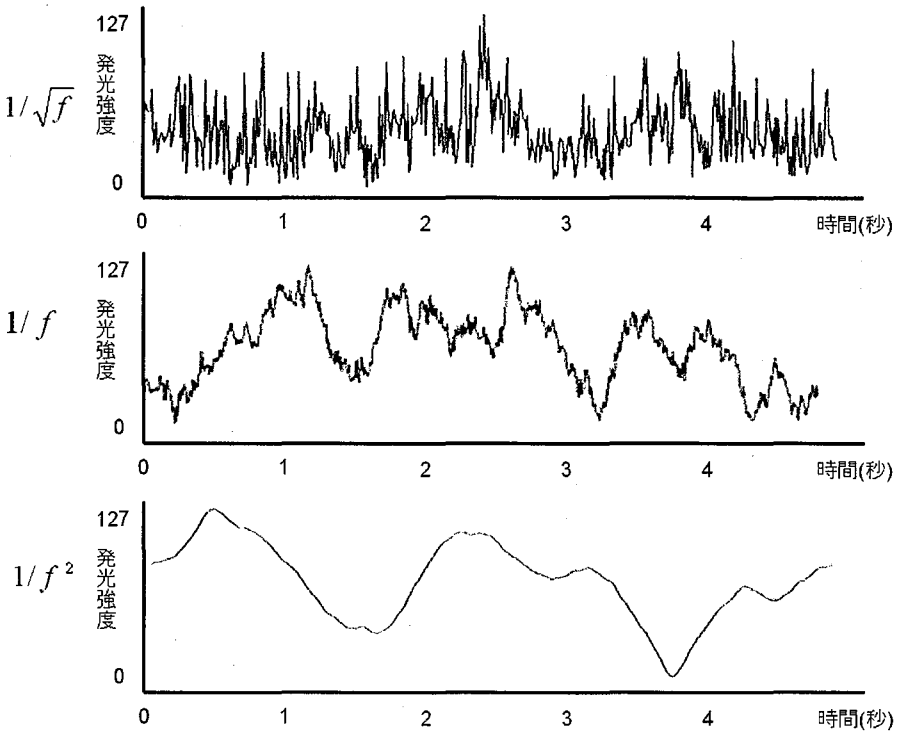


図 2.4: $1/f^n$ モデルの明滅パターン

を有する規則正しい単調なゆらぎとなる．図 2.4 に $1/\sqrt{f}$ ゆらぎ，$1/f$ ゆらぎ，$1/f^2$ ゆらぎの明滅パターンを示す．本研究では，1024 点の正規乱数から $1/\sqrt{f}$ ゆらぎ，$1/f$ ゆらぎ，$1/f^2$ ゆらぎ信号の生成を行う．$1/f$ ゆらぎは，まず正規乱数を高速フーリエ変換し，$1/f$ フィルタに通した後，逆フーリエ変換することで $1/f$ ゆらぎ信号を生成する．$1/f$ フィルタは，正規乱数の周波数軸データの各点に 1/1，1/2，1/3，…，1/1024 をそれぞれ掛け合わせることにより構成される．同様に $1/\sqrt{f}$ ゆらぎ信号を $1/\sqrt{f}$ フィルタに通し，$1/f^2$ ゆらぎ信号を $1/f^2$ フィルタに通し生成する．

### 2.3.3 評価用語の種類

本研究で用いた評価用語は，被服心理学領域に関連している先行研究 [11, 15, 26, 30, 31, 71, 73, 76] と，照明色彩学に関連している先行研究 [25, 62, 64, 68] から，以下の方法で 14 対を選定した．

**Step1：** 被服心理学領域の先行研究と，照明色彩学領域の先行研究それぞれの因子分析結

表 2.1: 14 対の形容語

| | |
|---|---|
| 下品な | 上品な |
| 派手な | 地味な |
| 目立たない | 目立つ |
| 軽快な | 重々しい |
| しとやかな | 活動的な |
| 調和した | 不調和な |
| 冷たい | 暖かい |
| 非都会的な | 都会的な |
| カジュアルな | フォーマルな |
| 安っぽい | 高級な |
| 親しみやすい | 親しみにくい |
| 心地よい感じ | 不快感じ |
| くつろぐ | 圧迫される |
| 単調な | 刺激的な |

果において，共通の因子内に入っている形容語対は，一つの同質な意味をなしているとみなし，グループ化を行った．

**Step2：** Step1 において，ある因子分析結果では同じグループに属している 2 つの形容語対に対し，別の因子分析結果では異なるグループとなっている場合，2 つの形容語対のなかで因子負荷量の低い形容語対を新しい単独のグループとした．これにより，因子負荷量は高くないが，評価対象が変わるとグループが変わる形容語対を抽出する．ここで抽出された形容語対は，これまで言及されていない別の因子と因子負荷量が高い可能性があり，別グループとして今回の実験に用いる．

**Step3：** 最終的に分けられたそれぞれのグループから因子負荷量の高い 14 対の形容語を抜き出した．

表 2.1 に選定した評価用語を示す．本実験では，全ての被験者に対し，表 2.1 に示す順序で評価用語を並べ，アンケート用紙に提示した．選定された 14 対の評価用語を用いて予備調査実験 [22] を行い，それぞれの形容語対において第 1，第 2，第 3 因子のいずれかと因子負荷量が高いことを確認した．この予備調査実験では，明滅パターンを，常時点灯，常時

表 2.2: 因子分析結果

| 形容語対 | 第一因子 | 第二因子 | 第三因子 | $h^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 安っぽい - 高級な | -0.946 | -0.095 | 0.197 | 0.943 |
| 都会的な - 非都会的な | 0.941 | 0.061 | -0.187 | 0.924 |
| 下品な - 上品な | -0.911 | -0.328 | -0.061 | 0.941 |
| フォーマルな - カジュアルな | 0.822 | 0.126 | -0.231 | 0.847 |
| 調和した - 不調和な | 0.587 | 0.456 | 0.248 | 0.614 |
| 派手な - 地味な | -0.024 | 0.987 | 0.113 | 0.988 |
| 目立たない - 目立つ | 0.066 | 0.942 | 0.101 | 0.902 |
| 刺激的な - 単調な | -0.074 | -0.779 | -0.218 | 0.660 |
| 軽快な - 重々しい | -0.414 | -0.746 | 0.125 | 0.744 |
| しとやかな - 活動的な | 0.625 | 0.696 | -0.125 | 0.891 |
| 冷たい - 暖かい | 0.368 | 0.593 | -0.049 | 0.489 |
| 心地よい感じ - 不快な感じ | 0.200 | 0.119 | 0.913 | 0.888 |
| 親しみやすい - 親しみにくい | -0.351 | -0.107 | 0.814 | 0.704 |
| くつろぐ - 圧迫される | -0.338 | 0.226 | 0.734 | 0.704 |
| 寄与度 | 4.718 | 4.282 | 2.331 | 11.331 |
| 寄与率 | 41.638 % | 37.787 % | 20.575 % | 100 % |

消灯，1秒点滅，3秒点滅，$1/f$ ゆらぎの5種類とし，明滅の色を赤に限定した．デザイン画はスーツ，パーカー，Tシャツの3種類を用い，被験者の数は10人とした．

### 2.3.4 実験手順

被験者に，衣服と明滅の印象の幅を明確にさせるため，提示する試料を3つのグループに分けて実験を行った．第1グループは，明滅を用いないスーツ，パーカー，Tシャツとした．第2グループは，衣服3種類×光3色×点滅の速さ3種類の計27種類とした．第3グループは，衣服3種類×光3色×$1/\sqrt{f}$ ゆらぎ，$1/f$ ゆらぎ，$1/f^2$ ゆらぎの計27種類とした．グループの実験実施順序は，第1グループ，第2グループ，第3グループの順とした．それぞれのグループにおいて，1つの衣服，1つの明滅パターンをランダムで表示し，14対の形容語で印象評価を行った．

表 2.3: 第 2 グループの因子得点結果

| 服の種類 | 色 | 点滅 | 第 1 因子 | 第 2 因子 | 第 3 因子 |
|---|---|---|---|---|---|
| スーツ | 赤 | 1 秒 | 0.786 | -1.197 | -1.473 |
| スーツ | 赤 | 2 秒 | 1.466 | -0.839 | -0.097 |
| スーツ | 赤 | 3 秒 | 0.893 | 0.640 | -1.999 |
| スーツ | 緑 | 1 秒 | 0.667 | -1.011 | 0.909 |
| スーツ | 緑 | 2 秒 | 0.789 | -0.232 | 0.417 |
| スーツ | 緑 | 3 秒 | 0.165 | -0.009 | -1.235 |
| スーツ | 青 | 1 秒 | 1.876 | 0.127 | 0.050 |
| スーツ | 青 | 2 秒 | 1.308 | 0.460 | -0.754 |
| スーツ | 青 | 3 秒 | 1.480 | 0.908 | -0.367 |
| パーカー | 赤 | 1 秒 | 0.218 | -1.377 | 0.780 |
| パーカー | 赤 | 2 秒 | 0.289 | -1.006 | 0.736 |
| パーカー | 赤 | 3 秒 | -0.174 | -0.162 | -0.230 |
| パーカー | 緑 | 1 秒 | 0.193 | -1.543 | 1.167 |
| パーカー | 緑 | 2 秒 | 0.070 | -0.523 | 1.792 |
| パーカー | 緑 | 3 秒 | -0.552 | 0.519 | 0.057 |
| パーカー | 青 | 1 秒 | 0.950 | -0.502 | 0.434 |
| パーカー | 青 | 2 秒 | 0.583 | 0.696 | -0.321 |
| パーカー | 青 | 3 秒 | 0.493 | 1.031 | -0.460 |
| T シャツ | 赤 | 1 秒 | -1.676 | -0.460 | -1.000 |
| T シャツ | 赤 | 2 秒 | -1.714 | -0.401 | -0.789 |
| T シャツ | 赤 | 3 秒 | -1.522 | 0.731 | -1.009 |
| T シャツ | 緑 | 1 秒 | -1.113 | -0.766 | 1.725 |
| T シャツ | 緑 | 2 秒 | -1.626 | -0.097 | 0.477 |
| T シャツ | 緑 | 3 秒 | -1.137 | -0.225 | 0.934 |
| T シャツ | 青 | 1 秒 | -0.763 | 0.782 | -0.459 |
| T シャツ | 青 | 2 秒 | -0.850 | 1.069 | -0.521 |
| T シャツ | 青 | 3 秒 | -1.037 | 1.482 | -0.957 |

## 2.4 実験結果

第 1 グループ，第 2 グループ，第 3 グループ全ての試料から全被験者の評定平均値を用いて，主因子法による因子分析を試みた．そして，バリマックス回転によって因子抽出を行った．その結果得られた因子負荷量を表 2.2 に示す．負の因子負荷量は，アンケートでの

表 2.4: 第3グループの因子得点結果

| 服の種類 | 色 | 点滅 | 第1因子 | 第2因子 | 第3因子 |
|---|---|---|---|---|---|
| スーツ | 赤 | $1/\sqrt{f}$ | 0.211 | -0.425 | -1.642 |
| スーツ | 赤 | $1/f$ | 0.662 | -1.560 | -0.142 |
| スーツ | 赤 | $1/f^2$ | 0.842 | 1.225 | 0.028 |
| スーツ | 緑 | $1/\sqrt{f}$ | 0.068 | -1.124 | -0.809 |
| スーツ | 緑 | $1/f$ | 0.556 | -1.238 | -0.082 |
| スーツ | 緑 | $1/f^2$ | 0.069 | 1.135 | 0.019 |
| スーツ | 青 | $1/\sqrt{f}$ | 0.604 | 0.276 | -0.393 |
| スーツ | 青 | $1/f$ | 1.697 | -0.477 | 0.542 |
| スーツ | 青 | $1/f^2$ | 1.544 | 1.552 | 0.544 |
| パーカー | 赤 | $1/\sqrt{f}$ | -0.425 | -1.425 | -1.871 |
| パーカー | 赤 | $1/f$ | 0.540 | -1.501 | 0.147 |
| パーカー | 赤 | $1/f^2$ | 0.171 | 0.890 | 0.209 |
| パーカー | 緑 | $1/\sqrt{f}$ | -0.592 | -1.360 | -0.515 |
| パーカー | 緑 | $1/f$ | 0.009 | -0.751 | 1.073 |
| パーカー | 緑 | $1/f^2$ | -0.156 | 0.675 | 1.025 |
| パーカー | 青 | $1/\sqrt{f}$ | 0.207 | 0.187 | -0.206 |
| パーカー | 青 | $1/f$ | 0.853 | 0.524 | 1.120 |
| パーカー | 青 | $1/f^2$ | 0.696 | 1.316 | -0.463 |
| Tシャツ | 赤 | $1/\sqrt{f}$ | -1.642 | -0.938 | -1.726 |
| Tシャツ | 赤 | $1/f$ | -1.263 | -0.104 | -0.083 |
| Tシャツ | 赤 | $1/f^2$ | -1.050 | 1.243 | 0.134 |
| Tシャツ | 緑 | $1/\sqrt{f}$ | -1.263 | -1.244 | 0.382 |
| Tシャツ | 緑 | $1/f$ | -0.973 | -1.076 | 1.783 |
| Tシャツ | 緑 | $1/f^2$ | -0.966 | 0.887 | 1.256 |
| Tシャツ | 青 | $1/\sqrt{f}$ | -0.597 | 0.855 | -0.487 |
| Tシャツ | 青 | $1/f$ | -0.370 | 0.520 | 0.433 |
| Tシャツ | 青 | $1/f^2$ | -0.643 | 2.271 | -1.052 |

形容語対の並べ方に依存している．表2.2は，3つの因子の中で最も大きい因子負荷量の絶対値に着目し，それぞれの因子で因子負荷量が高いものから順に形容語対の順番を並び替えた結果である．$h^2$は，形容語対ごとの3つの因子を二乗し合計した結果である．固有値は，第1因子が6.456，第2因子が3.337，第3因子が1.853，第4因子が0.690であり，固有値が1以上の因子に注目した．

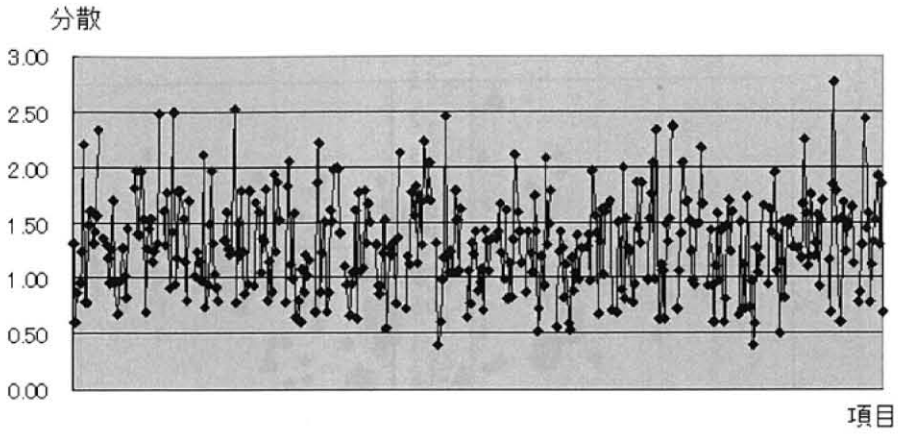


図 2.5: 第 2 グループにおける分散の値

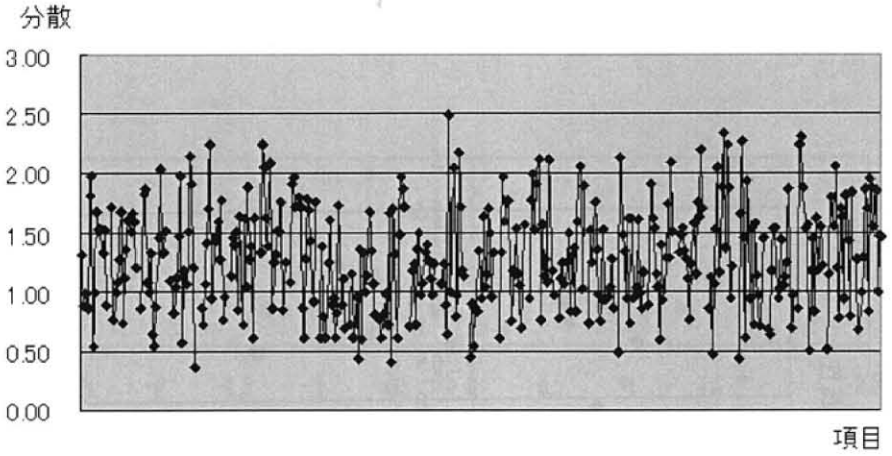


図 2.6: 第 3 グループにおける分散の値

第 1 因子との因子負荷量の高かった形容語対は，先行研究 [71] の因子分析結果におけるフォーマル性の因子群と形容語対が類似していた．このことから，第 1 因子を「フォーマル性」とした．第 2 因子との因子負荷量が高かった形容語対は，先行研究 [71] の因子分析結果における装飾性と形容語対が類似していた．このことから，第 2 因子を「装飾性」とした．第 3 因子との因子負荷量が高かった形容語対は，先行研究 [62] の因子分析結果におけるくつろぎ因子と形容語対が類似していた．このことから，第 3 因子を「くつろぎ」とした．次に，因子分析の結果をもとに因子得点の計算を行った．第 2 グループの因子得点結果を表 2.3 に，第 3 グループの因子得点結果を表 2.4 に示す．

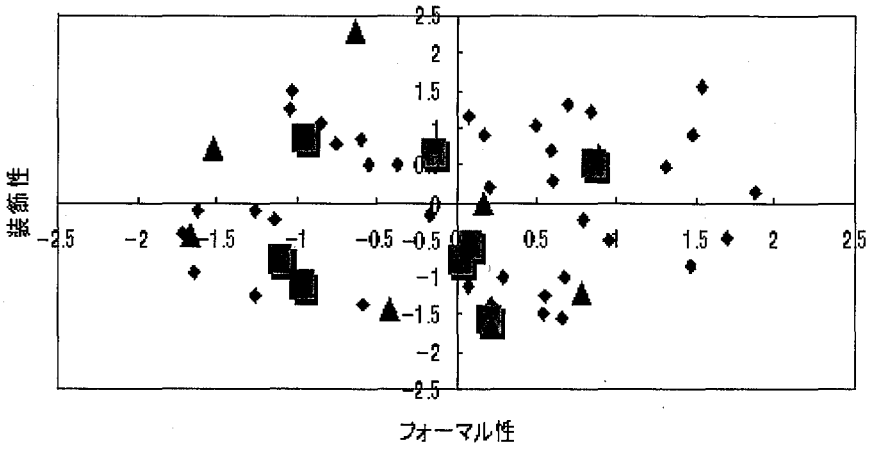


図 2.7: フォーマル性と装飾性における散布図

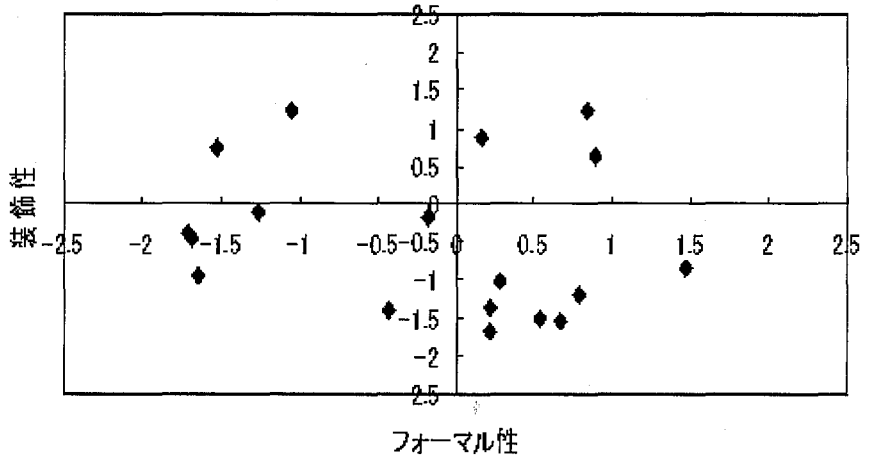


図 2.8: 明滅の色が赤の場合でのフォーマル性と装飾性における散布図

男女差を調べるために，男女ごとの平均について棄却域5％でt検定を行ったところ，有意差は見られなかった．第2グループと第3グループにおける分散の値を図 2.5 と図 2.6 に示す．ここでは全ての試料に対する14対の形容語それぞれの分散の値を示している．第2グループの方がやや分散の値が大きく，印象の個人差が大きいことがわかる．

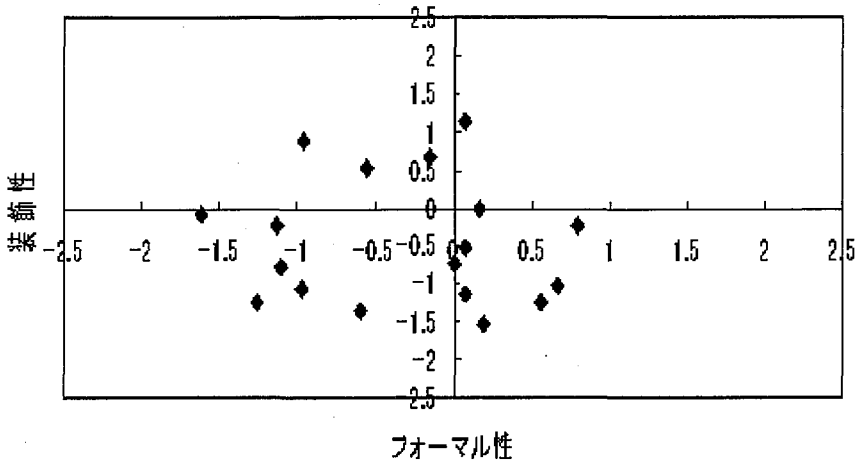


図 2.9: 明滅の色が緑の場合でのフォーマル性と装飾性における散布図

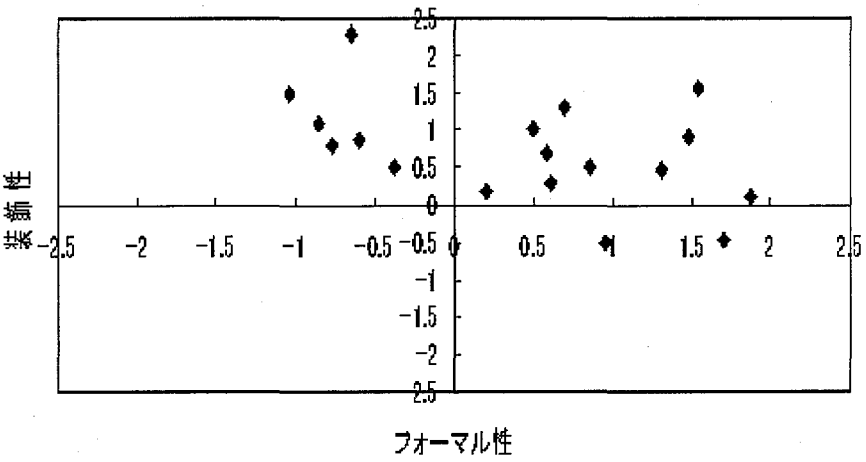


図 2.10: 明滅の色が青の場合でのフォーマル性と装飾性における散布図

## 2.5 考察

### 2.5.1 フォーマル性と装飾性

表 2.3 と表 2.4 の結果をもとに，フォーマル性と装飾性の平面で因子得点の散布図を作成し，くつろぎの因子得点が高い領域と低い領域について調べた．図 2.7 にフォーマル性と

装飾性の散布図を示す．四角の点は，くつろぎの因子得点が1以上であることを示す．三角の点は，くつろぎの因子得点が $-1$ 以下であることを示す．くつろぎの因子得点の低い点は，広い範囲に散布していることがわかった．くつろぎの因子得点が高い点は，フォーマル性と装飾性がともにやや低い領域に散布していることがわかった．このことから，電飾をデザインに利用したファッションは，派手でカジュアルな服装のほうが心地よい印象を与える傾向が見られた．しかし，派手でカジュアルな服装であっても，明滅パターンが赤の1秒点滅や赤の $1/\sqrt{f}$ の場合のように，明滅パターンとの組み合わせによって心地よくない印象を与える場合がある．

次に，フォーマル性と装飾性の平面で赤，緑，青それぞれの刺激の位置付けについて調べた．図2.8に明滅の色が赤の場合，図2.9に明滅の色が緑の場合，図2.10に明滅の色が青の場合のフォーマル性と装飾性の散布図を示す．赤の明滅は全体的に散布し，緑の明滅はフォーマル性と装飾性の因子得点がともに低い傾向が見られ，青の明滅はフォーマル性と装飾性の因子得点がともに高い傾向が見られた．

### 2.5.2 衣服と明滅の相乗効果

衣服と明滅のそれぞれの感情効果については，これまで多くの研究がなされ，今回の実験結果からも同じ傾向が見られた．そこで，明滅と因子得点の関係，衣服の変化と因子得点の関係の2つに着目する．これにより衣服と明滅の相乗効果について調べる．x軸を明滅のパターン，y軸を衣服の種類，z軸を因子得点とする等高線を図2.11から図2.19に示す．図2.11，図2.12，図2.13のグラフは，赤，緑，青の点滅とゆらぎにおけるフォーマル性の因子得点を示した結果である．図2.14，図2.15，図2.16のグラフは，赤，緑，青の点滅とゆらぎにおける装飾性の因子得点を示した結果である．図2.17，図2.18，図2.19のグラフは，赤，緑，青の点滅とゆらぎにおけるくつろぎの因子得点を示した結果である．それぞれのグラフにおいて，x軸とz軸で何らかの関係が見られ，さらにy軸とz軸で何らかの関係が見られる結果に着目した．

**フォーマル性**

衣服の変化とフォーマル性の因子得点に着目する．図2.11，図2.12，図2.13において，衣服がTシャツ，パーカー，スーツと変化していくにつれ，フォーマル性の因子得点が上昇する傾向が見られた．次に，明滅とフォーマル性の因子得点の関係に着目する．図2.11の赤のゆらぎにおいて，衣服がスーツの場合でゆらぎの波形を $1/\sqrt{f}$，$1/f$，$1/f^2$ と変化さ

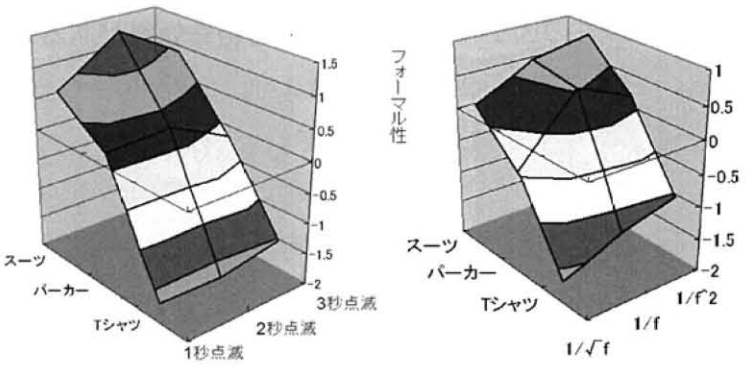


図 2.11: 赤の点滅とゆらぎにおけるフォーマル性の因子得点

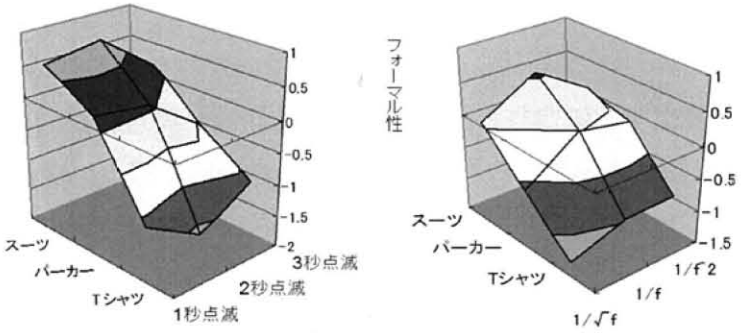


図 2.12: 緑の点滅とゆらぎにおけるフォーマル性の因子得点

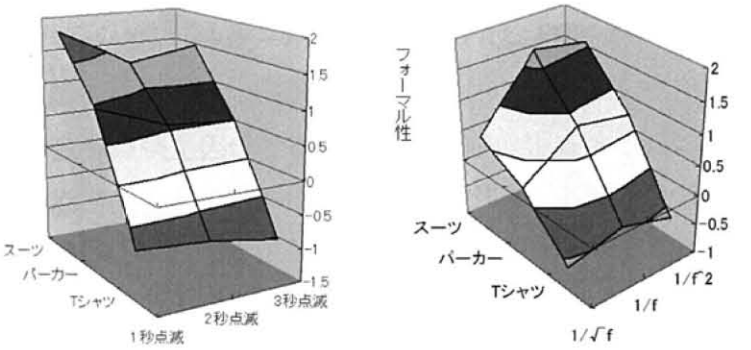


図 2.13: 青の点滅とゆらぎにおけるフォーマル性の因子得点

せたとき，フォーマル性の因子得点が 0.211，0.662，0.842 と高くなっている．また，衣服が T シャツの場合でゆらぎの波形を $1/\sqrt{f}$，$1/f$，$1/f^2$ と変化させたとき，フォーマル性の因子得点が −1.642，−1.263，−1.050 と高くなっている．このことから衣服の種類と赤のゆ

らぎの波形には，フォーマル性の因子得点を変化させる相乗効果があるのではないかと考えられる．図2.13において，青のゆらぎについては$1/f$，$1/f^2$間で大きな変化は見られないが，スーツ，パーカー，Tシャツそれぞれにおいて$1/\sqrt{f}$から$1/f$への変化でフォーマル性が高くなる傾向が見られた．このことから衣服の種類と青のゆらぎの波形には，フォーマル性を変化させる相乗効果があるのではないかと考えられる．

一方，図2.12において，緑のゆらぎは波形の変化にともないフォーマル性の因子得点が高くなる結果は見られなかった．図2.11，図2.12，図2.13における赤，緑，青の点滅の場合では，点滅速度の変化に伴いフォーマル性の因子得点が変化する結果は見られなかった．

**装飾性**

点滅の速度と装飾性の因子得点に着目する．図2.14，図2.15，図2.16において，点滅の速度が遅くなるにつれ装飾性の因子得点が高くなる傾向が見られた．ゆらぎにおいても，$1/\sqrt{f}$，$1/f$，$1/f^2$と変化するにつれ装飾性が高くなる傾向が見られた．次に，衣服の変化と装飾性の因子得点に着目すると，衣服の変化と装飾性の因子得点の変化には特徴的な関係が見られなかった．このことから今回の実験では，装飾性の因子得点において衣服と明滅の相乗効果が見られなかった．

**くつろぎ**

衣服の変化とくつろぎの因子得点に着目する．図2.17と図2.18のゆらぎにおいて衣服が，スーツ，パーカー，Tシャツと変化するにつれ，くつろぎの因子得点が高くなる傾向が見られた．次に，図2.17のゆらぎにおけるスーツ，パーカー，Tシャツでゆらぎの波形が$1/\sqrt{f}$，$1/f$，$1/f^2$と変化するにつれ，くつろぎの因子得点が高くなる傾向が見られた．このことから赤のゆらぎの波形と衣服の種類は，くつろぎの因子得点を変化させる相乗効果があるのではないかと考えられる．また，図2.18におけるスーツにて赤のゆらぎの波形が$1/\sqrt{f}$，$1/f$，$1/f^2$と変化するにつれ，くつろぎの因子得点が高くなる傾向が見られ，パーカーとTシャツでは$1/f$と$1/f^2$間で大きな変化は見られないが，$1/\sqrt{f}$から$1/f$への変化でくつろぎの因子得点が高くなる傾向が見られた．このことから，赤または緑のゆらぎと衣服の種類は，くつろぎの因子得点を変化させる相乗効果があるのではないかと考えられる．

図2.17における赤の点滅，図2.19における青のゆらぎでは，くつろぎの因子得点の急な変化が見られた．図2.19における青のゆらぎでは，$1/f$でくつろぎの因子得点が急上昇し，図2.17における赤の点滅では，スーツ，Tシャツの赤1秒点滅および3秒点滅でくつろぎ

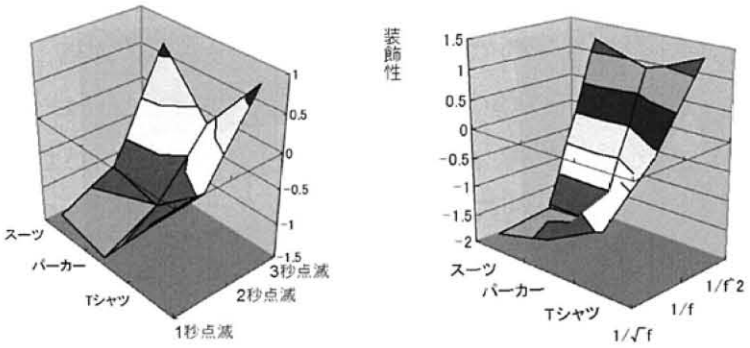


図 2.14: 赤の点滅とゆらぎにおける装飾性の因子得点

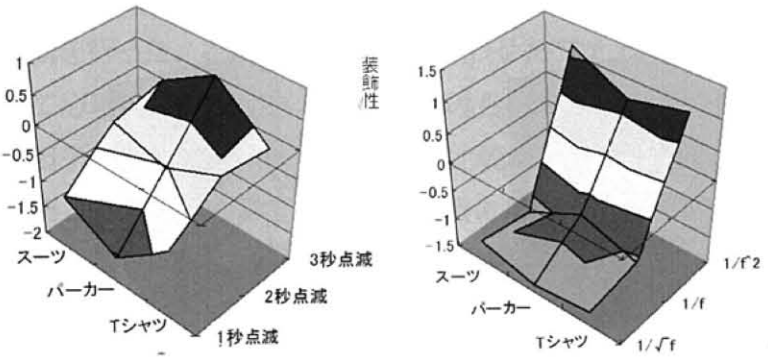


図 2.15: 緑の点滅とゆらぎにおける装飾性の因子得点

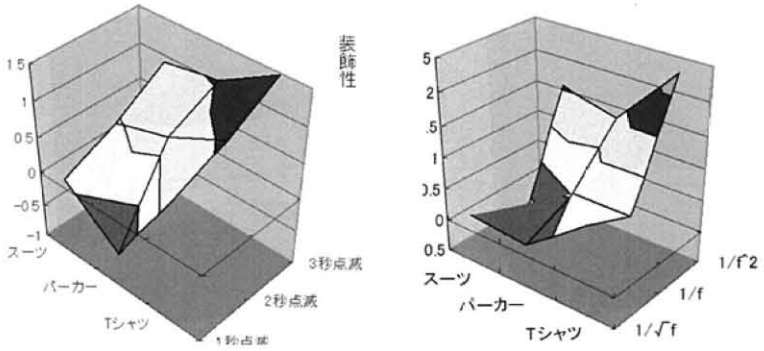


図 2.16: 青の点滅とゆらぎにおける装飾性の因子得点

の因子得点が急下降した．このような結果から，くつろぎの因子得点についてはさらなる追加実験を行い検証する必要があると考えられる．

日常生活では，赤のゆらぎはろうそくの炎に観察され，緑のゆらぎは木の葉のゆれに観

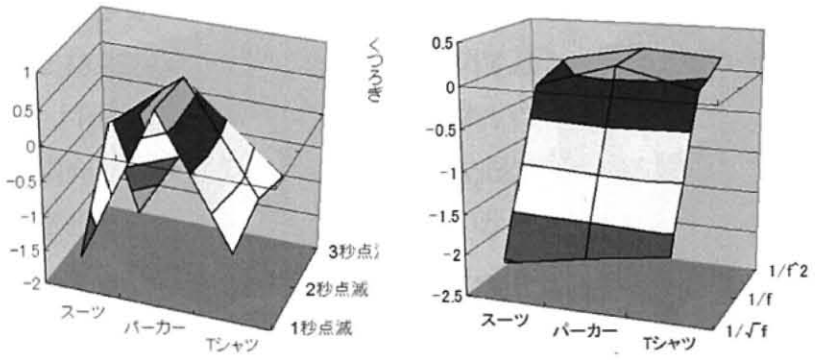


図 2.17: 赤の点滅とゆらぎにおけるくつろぎの因子得点

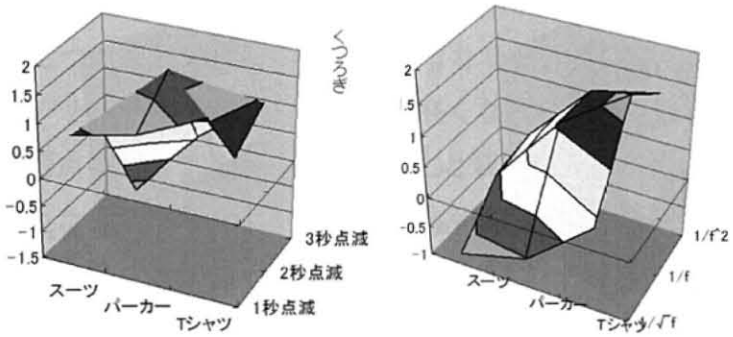


図 2.18: 緑の点滅とゆらぎにおけるくつろぎの因子得点

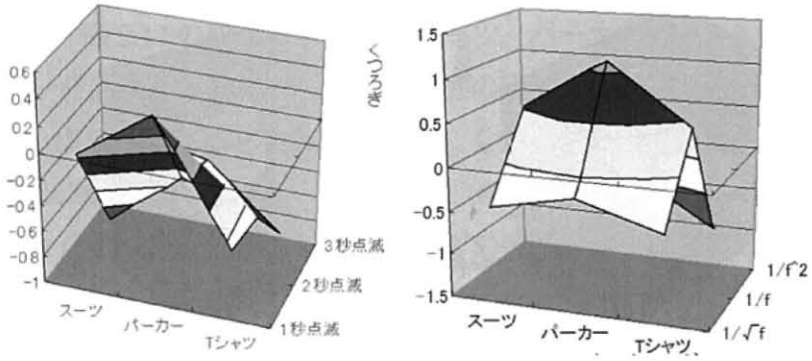


図 2.19: 青の点滅とゆらぎにおけるくつろぎの因子得点

察される．例えば，フォーマルな衣服と，ろうそくの炎から連想される場のイメージは，結婚式がある．カジュアルな衣服と，緑のゆらぎから連想される場のイメージは，森林浴がある．今回の実験では，衣服の種類と明滅のゆらぎから連想されるイメージを，明確に

述べることはできないが，日常生活における着装規範が関係しているのではないかと考えられる．一方，衣服の種類と点滅からは，何らかのイメージを連想することが困難であり，点滅をファッションとして利用することは難しいのではないかと考えられる．新しいファッションは，流行という要因が関係してくるため，普遍的な原理の発見は困難である．しかし，明滅をファッション性のあるインタフェースとするために，本研究で行った基礎的な評価実験は，有用性があると考える．

## 2.6 むすび

本研究は，衣服と明滅のイメージ評価を1つの尺度として用い，衣服と明滅について基礎的な評価実験を行った．衣服と明滅を組み合わせたファッションは増加傾向にあるが，その効用について心理的に評価を行ったものはみられず，本研究の新規性は高い．今回の実験では3つの因子が抽出され，先行研究との比較により第1因子をフォーマル性，第2因子を装飾性，第3因子をくつろぎとした．実験に用いた衣服と明滅の組み合わせについて因子得点の散布を調べたところ，くつろぎの因子得点が高い組み合わせは，フォーマル性と装飾性がともにやや低い領域に散布していることがわかった．また，赤のゆらぎの波形と衣服の変化には，フォーマル性とくつろぎの因子得点を変化させる相乗効果が定量的に示唆された．青または緑のゆらぎの波形と衣服の変化には，$1/\sqrt{f}$ と $1/f$ の間で，それぞれフォーマル性とくつろぎの因子得点を変化させる相乗効果が定量的に示唆された．くつろぎの因子得点については，衣服と明滅の組み合わせによって急上昇や急下降が見られた．

# 第3章

# 明滅制御システム

## 3.1 まえがき

第1章で述べた電飾ファッションや電飾パフォーマンスは，その表現力を高めるために，より豊かな明滅表現を実現することが重要となる．そのためには，技術者および非技術者を含む様々な分野のユーザが，明滅の設計と細かい編集作業を繰り返し行い，試行錯誤しながら表現力を向上させる必要がある．第2.5節で述べたように，ゆらぎのような複雑な明滅を細かく編集することで，電飾ファッションの印象を変化させることが可能となることから，明滅の細かい編集が重要となる．また，パフォーマンスが長時間に及ぶ場合は，単調な明滅表現にならないように，できるだけ長時間の明滅パターンを表現することが求められる．

従来から，イルミネーション機能付き携帯電話，LEDベルトバックル，電子アクセサリ等が市販されており，これらを用いることで電飾ファッションや電飾パフォーマンスを実現することは可能である．しかし，イルミネーション付き携帯電話は，数種類の明滅パターンを選択することができるが，ユーザが意図したオリジナルの明滅パターンを作成することはできない．LEDベルトバックル [43] は，3つのボタンで表示させる文字を入力できるが，長時間のパターンや細かい編集には適さない．LEDはマイコンで容易に制御することができるが，ユーザがイメージした通りの明滅パターンを実装するためには，細かいプログラムの修正とデバイスへの書き込みを繰り返す必要がある．一般的に広く利用されているPIC（Peripheral Interface Controller）のための開発環境であるMPLAB [50] は，PICの動作をシミュレートする機能を持つが，プログラムはアッセンブリ言語もしくはC言語で

書かれるため，非技術者には使いにくい．ユビキタスコンピューティングのために実装されている小型デバイス [3, 16, 49] は，小規模，小メモリであり，長時間の複雑な明滅パターンの再生は考慮されていない．

一方，LEDを用いたウェアラブルシステムに関する先行研究は，センシングによる光と環境のインタラクションに関する研究 [4, 33, 58]，導電性の生地や試作システム制作のための構築キットに関する研究 [5, 7]，LEDを用いたコミュニケーションに関する研究 [39, 40, 53] がある．しかし，これらの先行研究における明滅パターンの制御は，ユーザが直観的に明滅を設計することは考慮されていない．

そこで本章では，単独デバイスを対象とした明滅制御システムの構築について述べる．提案システムでは，直観的な明滅設計機能の提案と明滅パターンの圧縮を実現する．これにより，技術者および非技術者を含む様々なユーザが長時間の明滅パターンを直観的に作成し，意図した明滅表現を実現しやすくする．

以下では，第3.2節で，本章で提案する明滅制御システムの要求事項について述べる．第3.3節では設計について述べ，第3.4節では実装について述べる．第3.5節では評価について示し，第3.6節では関連研究について説明し，最後に第3.7節で本章のまとめを行う．

## 3.2 要求事項

本節では，明滅制御システムの要求事項として，直観的な明滅設計方式，明滅パターンの圧縮，明滅パターン開発環境について述べる．

### 3.2.1 直観的な明滅設計方式

直観的な明滅設計方式は，明滅設計モデルとの一致，明滅表現との一致，細かい編集が可能であることが重要である．

#### 明滅設計モデルとの一致

アート表現のための明滅は，設計・実装・評価の試行を繰り返すことでより良いパターンに仕上げていく（図3.1）．明滅の表現力を向上させるために，段階的に明滅パターンを作成し，作成したパターンを簡単に繰り返し編集できる設計モデルがより豊かな明滅表現の創作に適している．

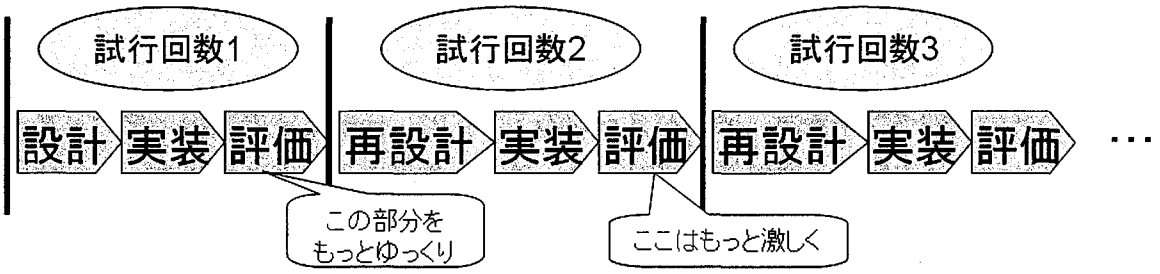


図 3.1: 明滅設計モデル

**明滅表現との一致**

作成した明滅パターンを再設計する場合,「この部分をもっとゆっくり」といった明滅表現を編集作業に直接利用することで直観的な明滅設計が可能となる．しかし，マイコンプログラミングで一般的に使われているC言語 [63] は，明滅表現との間に隔たりがあるため，使い慣れないユーザにとっては意図した編集作業が直観的にできない．直観的な明滅設計方式として，明るさの微調整や明滅のタイミングを明滅表現に沿って編集する方式が有効である．

**細かい編集**

明滅の表現力を向上させるために細かい編集作業が必要となる．従来から，家庭や店舗を対象とした固定型調光システム [54] があり，演出パターンの選択やダイヤルによるテンポのアップダウンを制御できる．しかし，より豊かな明滅表現を実現するためには，さらに細かい編集が必要となる．作成した明滅パターンが長時間に及ぶ場合でも，その一部分だけをユーザが納得するまで細かく繰り返し編集することが求められる．

### 3.2.2 明滅パターンの圧縮

パフォーマンスが長時間に及ぶ場合，表現力を向上させるために，より長時間の明滅パターンを保存する必要がある．メモリ容量の小さい小型のデバイスで，より長いパターンを実装するために，明滅パターンの圧縮が必要と考えられる．

### 3.2.3 明滅パターン開発環境

非技術者を含む様々な分野の人間が，直観的な明滅設計方式と明滅パターンの圧縮機能を利用するために，明滅パターン開発環境が求められる．明滅パターン開発環境では，明滅パターンのグラフ表示，明滅パターンのデザイン，圧縮手法の選択，デバイスへの明滅パターン書込みを行う明滅編集ソフトウェアと，電子工作技術を持たないユーザがプロトタイプシステムを簡単に構築するためのデバイスが必要となる．電飾ファッションや電飾パフォーマンスに利用することを想定したデバイスの要求事項を以下に示す．

- 携帯性

  衣服にデバイスを組み込んだ場合，動作の妨げにならないように，小型化，軽量化が必要である．また，衣服の洗濯を可能とするため，デバイスはポケットに入れて取り外しが可能である状態が適している．

- 耐久性

  衣服の着脱，はげしい動作時にかかる負荷に耐える耐久性が必要である．特に配線の断線を防ぐ仕組みが重要となる．断線が発生した場合，一部のLEDが光らないもしくは色が変化する事態が発生する．光を利用したパフォーマンスは目立つという特性から，色の変化が顕著に表れてしまう．パフォーマンスのクオリティを向上させるために，激しい負荷に耐える耐久性が求められる．

- 汎用性

  デバイスはファッションショーなど様々なイベントで利用されるため，ショーの場面やその使用方法により仕様が変更することがある．イベント本番直前でも，瞬時に明滅パターンの書換えができるなど汎用的な使い方が求められる．

- 機能性

  パフォーマンスでは，確実に意図通りに光らせることが重要である．明滅パターンの再生方式はアクション型とプロシージャ型に区分される．アクション型は，センシングにより動きに合わせた明滅の変化や，スイッチによる明滅パターンの切り替えなど，動作に合わせて明滅パターンを再生する．一方，プロシージャ型はあらかじめプログラミングされたシーケンシャルな明滅パターンを再生する．アクション型はパフォー

マンスの本番で意図通りに明滅しない事態が発生する可能性があり，またスイッチによる切り替えは演技中に余計な動作を必要とする．しかし，プロシージャ型は起動さえすれば確実に意図した明滅パターンを再生するため，デバイスの再生方式としてプロシージャ型を用いる．

## 3.3 設計

前節で述べた要求事項を満たすように，PC と小型 LED 制御デバイスを組み合わせたシステムを設計する．PC 上で明滅パターンの作成を行った後，小型 LED 制御デバイスにそのパターンを実装する．本節では，直観的な明滅設計方式，明滅の圧縮方式，小型 LED 制御デバイスについて説明する．

### 3.3.1 直観的な明滅設計方式

本システムでは，直観的な明滅設計方式としてインクリメンタルプログラミングを採用し，PC 上で実行する．インクリメンタルプログラミングは，プログラムを追加記述していくことで，以前試行したプログラムの作用を変更させながら，明滅パターンを段階的にデザインする方式と定義する．インクリメンタルプログラミングの特徴を以下に示す．

- 追加プログラムの逐次処理

  プログラムを追加するたびに明滅パターンを編集していくため，意図した明滅パターンへ段階的に近づけていくことができる．

- 時間区分の指定

  明滅パターンの時間区分を指定することで，以前の明滅パターンを反映させながら，プログラムの追加のみで明滅パターンの設計と編集を行うことができる．

- 思考プロセスの保存

  追加したプログラムの履歴を残すことで，ユーザの思考プロセスを他のユーザと共有することができる．

インクリメンタルプログラミングでは，PC 上でユーザがプログラムを追加するたびに，PC が明滅パターンのグラフを変更する．表 3.1 に，明滅パターンの編集に有効と考えられ

表 3.1: 明滅パターンプログラム記述向けスクリプト

| スクリプト | 明滅パターンへの作用 |
|---|---|
| led$x$ = bright($y$) in $t$ sec | ポート $x$ で，明るさ $y$ の光を $t$ 秒間追加する． |
| led$x$ = lightup/lightdown between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$ で，$t$ 秒間かけて明るさ $a$ から $b$ までの範囲で，徐々に明るく/暗くなるパターンを追加する． |
| led$x$ = sinewave($h$) between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$ で，明るさ $a$ から $b$ までの範囲で，$h$Hz の正弦波を $t$ 秒間追加する． |
| led$x$ = blink($s$) between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$ で，明るさ $a$ と $b$ の点滅を $t$ 秒間追加する． |
| open($file$) | 点滅パターンを保存したテキストファイル ($file$) を読み込み追加する． |
| led$x$ = sinewave($h1$) + sinewave($h2$) between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$ において，明るさ $a$ から $b$ までの範囲で，$h1$Hz の正弦波と $h2$Hz の正弦波を組み合わせたパターンを $t$ 秒間追加する． |
| for($x$){} | {} 内にかかれた処理を $x$ 回繰り返す． |
| at $t1$ insert{} | $t1$ 秒の箇所に {} 内でかかれた明滅パターンを挿入する． |
| filter(1/f){} | {} 内の明滅パターンに対し，$1/f$ フィルタを掛ける． |
| from $t1$ to $t2$ led$x$ darker / brighter | $t1$ 秒〜$t2$ 秒の $x$ ポートのパターンを一定量暗く/明るくする． |
| from $t1$ to $t2$ led$x$ slower / faster | $t1$ 秒〜$t2$ 秒の $x$ ポートのパターンを一定量遅く/速くする． |
| from $t1$ to $t2$ led$x$ repeat / half | $t1$ 秒〜$t2$ 秒の $x$ ポートのパターンを繰り返す/半分にする． |
| from $t1$ to $t2$ in led$x$ filter(1/f) | $t1$ 秒〜$t2$ 秒の $x$ ポートのパターンに $1/f$ フィルタをかける． |
| from $t1$ to $t2$ in led$x$ skip | $t1$ 秒〜$t2$ 秒の $x$ ポートのパターンを削除する． |

る明滅パターンプログラム記述向けスクリプトを示す．スクリプトの between $a$ and $b$ を省略した場合は，発光強度の上限と下限が指定される．図 3.2 に，$1/f$ フィルタ使用例を示す．図 3.2 に示すように，変換前の明滅パターンが以前試行したプログラム群で作成されているとする．ここで，“from 0 to 7 in led1 filter(1/f)”のスクリプトを追加することにより，以前の明滅パターンの波形をある程度残しながら，$1/f$ ゆらぎに近い波形を作成することができる．図 3.3 は，明滅パターンの編集例を示したものである．編集前の明滅パターン（図 3.4）は，図 3.3 中のプログラムの 1 行目から 13 行目までで構成されている．ここで，0 秒から 6 秒までのポート 2 の明滅パターンを少し暗くしたいという要求があるとする．この要求に対し，従来のプログラミング方式は，図 3.3 の ① に示すように 6〜9 行目と 13 行目のプログラムを書換える必要がある．一方，インクリメンタルプログラミングは，図 3.3 の ② に示すように 14 行目のプログラムを追加するだけで明滅パターンの編集が可能とな

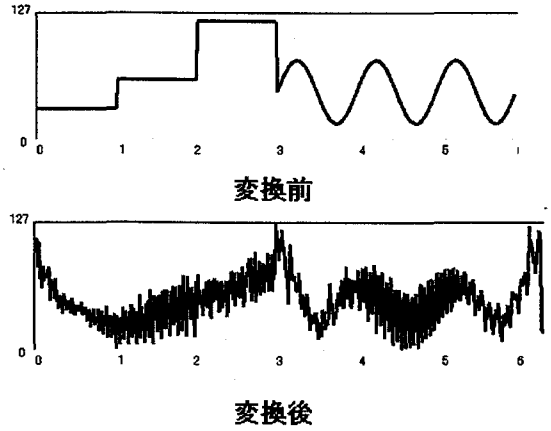


図 3.2: $1/f$ フィルター使用例

```
led1 = lightup in 0.5 sec   between 0 and 100 ①
led1 = lightdown in 0.5 sec   between 0 and 100 ①
led1 = lightup in 1 sec   between 0 and 100 ①
led1 = lightdown in 1 sec   between 0 and 100 ①
led2 = bright(0) in 0.2 sec
led2 = lightup in 0.5 sec
led2 = lightdown in 0.5 sec
led2 = lightup in 1 sec
led2 = lightdown in 1 sec
led1 = sinewave(0.5) in 4 sec   between 0 and 100 ①
led2 = sinewave(0.5) in 4 sec
from 0 to 5 led1 darker ②
```

図 3.3: スクリプトの編集例

る．図 3.5 に編集後の明滅パターンを示す．インクリメンタルプログラミングは，一度作成した明滅パターンに対し，細かい編集を繰り返し行う場合に有効な方式となる．

### 3.3.2 圧縮方式

mp3，jpeg，zip など，音声，画像，データファイルなどの圧縮アルゴリズムは以前より数多く研究されている [61, 75]．しかし，従来のファイル圧縮や静止画圧縮で用いられてい

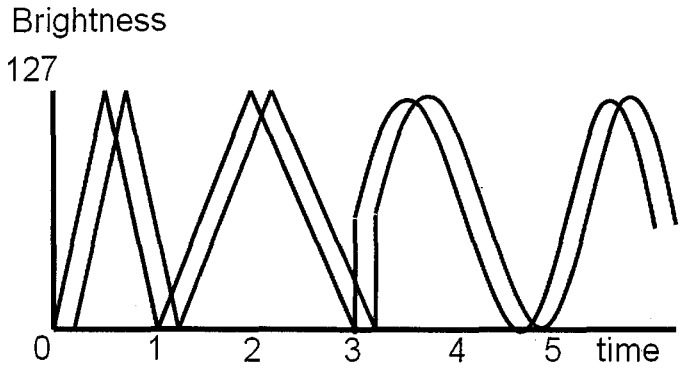


図 3.4: 変更前の明滅パターン

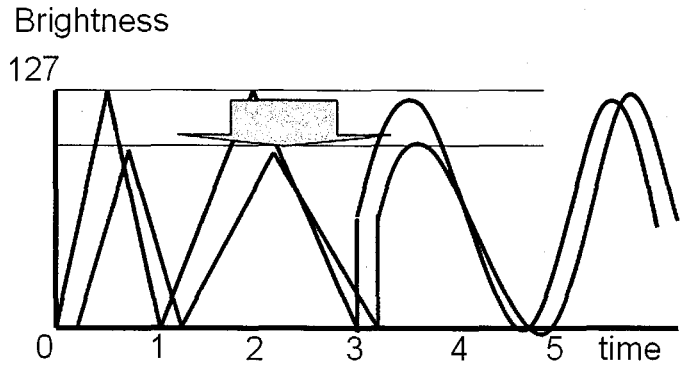


図 3.5: 変更後の明滅パターン

る圧縮方式で明滅パターンを圧縮する場合，次の問題がある．マイコンは，低速でメモリ容量に制限があるため，PWM 周期内で圧縮データの解凍を行わなければならない．また，明滅パターンは離散的な値であるため，パターンの種類によっては圧縮率が悪くなることが考えられる．そこで，次の 5 つの圧縮方式を実装する．可変周期サンプリングと，スクリプト解釈による圧縮は本研究で新たに提案したものである．また，従来からの代表的な圧縮手法として差分符号化とパレット符号化による圧縮，可変周期サンプリングと差分符号化を組み合わせた圧縮を用いる．

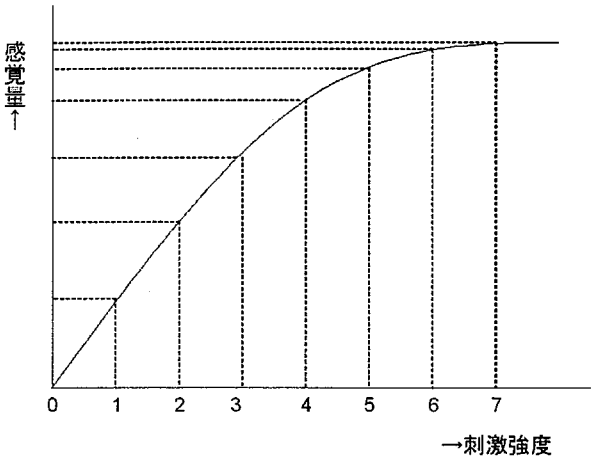


図 3.6: 刺激強度と感覚量の関係

表 3.2: PWM 周期の変動表

| 発光強度 | PWM 周期 |
|---|---|
| 0〜31 | 13msec |
| 32〜63 | 26msec |
| 64〜95 | 39msec |
| 96〜127 | 52msec |

**可変周期サンプリング**

人間の目は，暗い光の変化を判別しやすく，明るい光の変化を判別しにくいという特性を持つ [55]．図 3.6 に刺激強度と感覚量の関係について示す．感覚の強さの変化量は，刺激が強いほど減少し，刺激が弱いほど増加する．この特性は，ウェーバー・フェヒナーの法則といわれ，ある感覚器官を通じて人間が感じる感覚の大きさを $S$，その物理的刺激量の大きさを $I$ としたとき，式（3.1）となる．このとき $k$ と $c$ は定数である．

$$S = k \log I + c \tag{3.1}$$

この特性より，発光強度に応じて PWM 制御の周期を表 3.2 のように動的に変化させ，データを間引く．

表 3.3: スクリプト解釈方式

| スクリプト | データ形式 |
|---|---|
| led$x$ = bright($y$) in $t$ sec | ポート $x$（1バイト），スクリプトの種類（1バイト），<br>時間 $t$（1バイト），duty 比 $y$（1バイト） |
| led$x$ = lightup / lightdown between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$（1バイト），スクリプトの種類（1バイト），<br>時間 $t$（1バイト），先頭 duty 比（1バイト），<br>差分データ（1バイト） |
| led$x$ = sinewave($h$) between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$（1バイト），スクリプトの種類（1バイト），<br>時間 $t$（1バイト），1周期分の duty 比，<br>終了フラグ（1バイト） |
| led$x$ = blink($s$) between $a$ and $b$ in $t$ sec | ポート $x$（1バイト），スクリプトの種類（1バイト），<br>時間 $t$（1バイト），点滅間隔 $s$（1バイト），<br>duty 比最大値 $a$（1バイト），duty 比最小値 $b$（1バイト） |
| その他 | ポート（1バイト），スクリプトの種類（1バイト），<br>時間（1バイト），全ての明滅 duty 比，<br>終了フラグ（1バイト） |

### スクリプト解釈

マイコンモジュールは，明滅パターンの設計に使用したスクリプトを保存することで，使用するメモリ量を減らすことができる．保存するスクリプトのデータフォーマットを表3.3に示す．lightup/lightdown では，明滅データの差分が1以下の場合に対応するため，差分データを $(|a-b|)*10/(t*100/13)$ とする．sinewave では，マイコン上で正弦波を計算させるメモリ容量を確保できないため，1周期分の duty 比を保存する．

### 差分符号化

明滅パターン中には，同じ発光強度の変化量が何度も繰り返される変化量の偏りが存在する．そこで，差分符号化により変化量の偏りを圧縮する．まず，先頭の明滅データ以外を差分データとする．差分データ中で，3つ以上連続して同じデータが並んでいる場合，フラグ（1バイト），差分データ（1バイト），繰り返し回数（1バイト）として圧縮する．

#### パレット符号化

zipなどに見られる辞書法を利用する．前に出現したデータ列を検索し，最も一致した部分のインデックスとデータ列数を指すことによって圧縮を行う．マイコンのメモリ容量に制限があるため，256バイトのデータ列をパレット辞書として圧縮を行う．

#### 可変周期サンプリング＋差分符号化

可変周期サンプリングによる圧縮を行ったデータに対し，差分符号化による圧縮を行う．

### 3.3.3 小型LED制御デバイス

小型LED制御デバイスは，マイコン，外部記憶装置，無線モジュールで構成され，LEDの明滅を制御するデバイスを指す．人間の目は点滅光の点滅周波数を次第に高くしていくと，ある一定周波数をこえた時点で点滅を感じなくなる．この臨界周波数をフリッカー周波数（CFF：Critical Flicker Frequency）と言う．明滅の変化の幅が一定の場合，点滅周波数がフリッカー周波数を超えると人間の目はちらつきを感じなくなり，一定の明るさの光として知覚される．フリッカー周波数は指標の輝度や面積によって変化するが，超高輝度（330cd/m$^2$）のもので約60Hzである [12]．LEDの明滅において，点灯時間と消灯時間のコントロールにPWM（Pulse Width Modulation:パルス幅変調）制御を用いることにした．PWMとは，周期を一定にしパルス幅の比率を変えて平均エネルギーを可変制御する方法を指し，モータの速度制御や回転数制御，スイッチング電源の低電圧制御，D/A変換，温度制御などに用いられている．PWM制御において一周期におけるパルスの“High”の割合を“デューディ”と呼び，パルスの周期を$T$，パルスのHighの時間を$H$とすると，デューディ比は次式で求められる．

$$\text{デューディ比}\,[\%] = (H/T) \times 100 \tag{3.2}$$

光の強度を表す単位には光度（カンデラ），輝度（カンデラ毎平方メートル），照度（ルクス）などがあるが，本研究ではこのデューディ比を知覚光の光の強度の尺度とし，0〜127で表す．0が最も暗い光（消灯）を示し，127が最も明るい光（点灯）を示す．

図3.7はPWM制御による発光強度の制御原理を表している．上図は時間変化にともなうパルスの様子，下図はデューディ比と発光強度の関係を表している．(a) はデューディ比

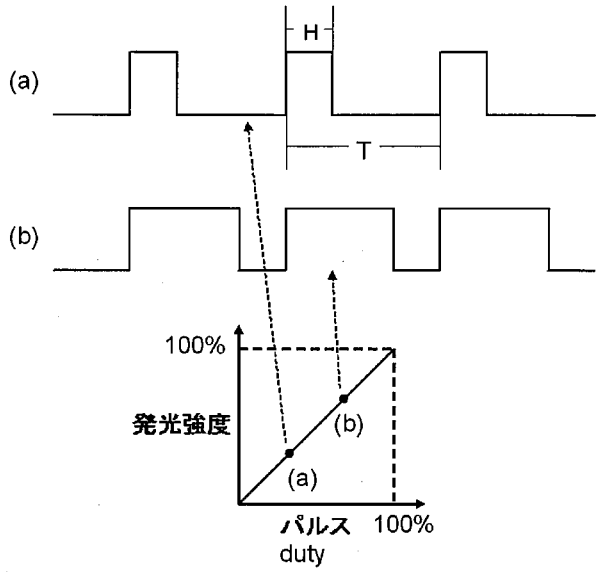


図 3.7: PWM 制御による発光強度の制御原理

が約 30%，(b) はデューティ比が約 70% となっており，(a) の方が (b) より光の強度が強いことになる．

本研究では PWM 制御の周期を 13 ミリ秒とし，duty 比の分解能を 7 ビットの 128 段階とする．小型 LED 制御デバイスは，外部記憶装置に明滅パターンを記憶する．

## 3.4 実装

本システム全体の機器構成を図 3.8 に示す．PC と小型 LED 制御デバイスの通信は，シリアルポートを用いて通信速度 9600bps，データ長 1 バイトの RS232C 通信を行う．小型 LED 制御デバイスの回路構成を図 3.9 に示す．

小型 LED 制御デバイスは，マイクロチップテクノロジ社の PIC16F876（プログラムメモリ：8K バイト，RAM：368 バイト，EEPROM256 バイト）を 20MHz で動作させて用いている．開発には PIC C コンパイラ [63] を用いた．基板の大きさは，40 × 60 × 25(mm) である．外部記憶装置として，32K バイトの EEPROM を用いている．EEPROM は使用 I/O ポート数に応じて分割し，0 番地には使用 I/O ポート数と圧縮手法を識別するコードを格納する．PIC と EEPROM との通信は $I^2C$ 通信により行う．EEPROM に格納するデー

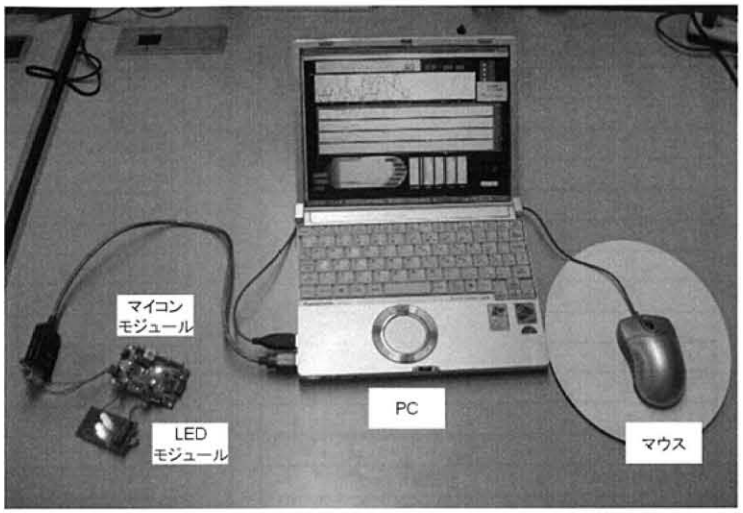


図 3.8: 提案システムの機器構成

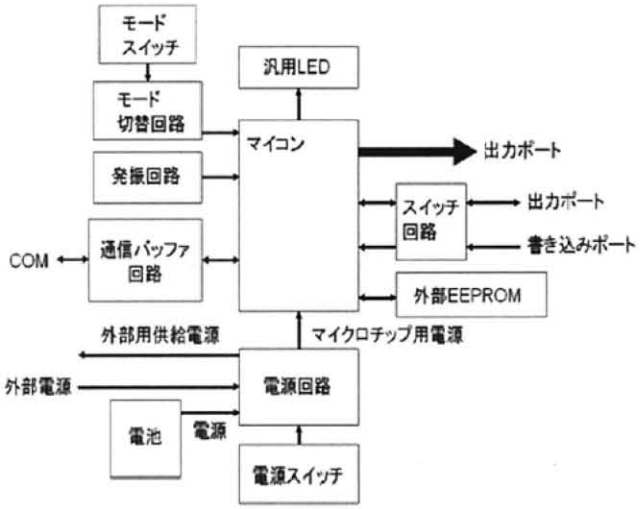


図 3.9: 小型 LED 制御デバイスの回路構成

タ構造を図 3.10 に示す．32k バイトの EEPROM を使用したので，そのメモリアドレスは 0〜32767 の 2 バイトになる．これをアドレス記述部と各 I/O ポートの明滅データを保存する部分に分割する．使用 I/O ポート数によって分割の仕方は変動する．0 番地には使用 I/O ポート数と圧縮手法を区別するための圧縮番号を合わせて格納しておく．図 3.10 中の "firstaddress" とは各 I/O ポートの最初の明滅データを格納しているメモリアドレスを示し，"lastaddress" とは最後の明滅データを格納しているメモリアドレスを示す．"lastaddress"

| | address(2byte) | data(1byte) |
|---|---|---|
| アドレス記述部 | 0 | 使用I/Oポート数, 圧縮No. |
| | 1 | lastaddress0の上位1byte |
| | 2 | lastaddress0の下位1byte |
| | 3 | lastaddress1の上位1byte |
| | 4 | lastaddress1の下位1byte |
| | 5 | lastaddress2の上位1byte |
| | 6 | lastaddress2の下位1byte |
| | 7 | lastaddress3の上位1byte |
| | 8 | lastaddress3の下位1byte |
| | 9 | lastaddress4の上位1byte |
| | 10 | lastaddress4の下位1byte |
| | ・ | ・ |
| | ・ | ・ |
| ポート0 | firstaddress0 | 明滅データ |
| | firstaddress0+1 | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | lastaddress0 | 明滅データ |
| | lastaddress0+1 | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| ポート1 | firstaddress1 | 明滅データ |
| | firstaddress1+1 | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | lastaddress1 | 明滅データ |
| | lastaddress1+1 | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |

| | address(2byte) | data(1byte) |
|---|---|---|
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| ポート2 | firstaddress2 | 明滅データ |
| | firstaddress2+1 | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | lastaddress2 | 明滅データ |
| | lastaddress2+1 | * |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| ポート3 | firstaddress3 | 明滅データ |
| | firstaddress3+1 | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | ・ | 明滅データ |
| | lastaddress3 | 明滅データ |
| | lastaddress3+1 | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| ポート4 | firstaddress4 | 明滅データ |
| | | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| ・・ | ・ | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| | ・ | — |
| | 32766 | — |
| | 32767 | — |

図 3.10: EEPROM内のデータ構造

はアドレス記述部に順に格納しておく．図中の“—”はデータが無いことを示す．小型LED制御デバイスは再生モードと書込みモードがあり，スイッチにより切り替えを行う．再生モードでは起動と同時に保存している明滅パターンを再生する．一方，書込みモードはPCから送られてくる明滅パターンを保存する．試作した小型LED制御デバイスを図3.11に示す．

PC上のソフトウェアの開発は，Windows XP上でMicrosoft Visual Basic.NET 2003を用いた．PC側のインタフェース（図3.12）には，横軸を時間，縦軸を発光強度とする明滅パターングラフ，ポート指定機能，圧縮方法を指定する機能，一度作った明滅パターンの保存機能，明滅パターン表示ウィンドウをスクロールする機能，使用メモリ表示機能，明滅パターンシミュレーション機能を設けた．描画エディタでは，マウス操作により線また

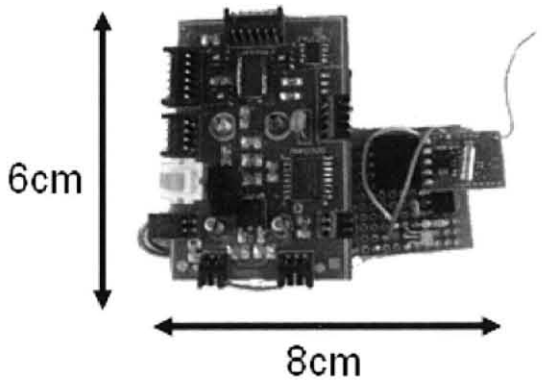


図 3.11: 試作デバイス

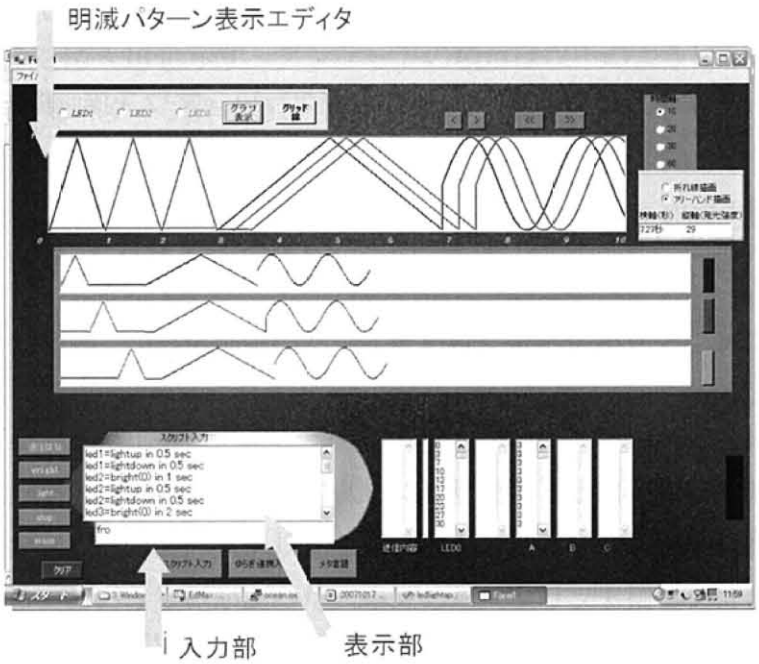


図 3.12: 編集ソフトウェアの画面

は曲線を描画し，明滅パターンを簡単に作成できる．入力部にプログラムを入力することで，インクリメンタルプログラミングを実行する．出力部に，追加したプログラムの履歴を表示する．

## 3.5 評価

本節では，インタフェースの評価実験，圧縮率の比較，提案システムの実運用評価について述べる．

### 3.5.1 インタフェースの評価実験

本システムのインタフェースの有効性を調べるために，アンケートをもとにした評価実験を行った．実験内容，被験者，アンケート結果を次に示す．

#### 実験内容

実験に用いたシステム構成は図3.8と同じである．実験ではWindows XPが動作するノートパソコンとマウスを利用した．具体的な実験手続きについて説明する．

1. 最初に，被験者へ評価実験に関する説明を行い，マウス描画機能について説明する．(約5分)

2. 被験者にマウス描画機能で明滅パターンを作成してもらう．(約10分)

3. 被験者にインクリメンタルプログラミングの説明を行い，明滅パターンのプログラミングをしてもらう．(約15分)

4. 被験者にマウス描画とインクリメンタルプログラミング方式を組み合わせて，明滅パターンを作成してもらう．(約5分)

5. 被験者に自由に明滅パターンを作成してもらう．(約25分)

実験時間は約1時間で，実験を行う際にはスクリプトが書かれたマニュアルを用意した．

#### 被験者

被験者は，一般的なプログラミングの知識を持った工学部の20代の男性10人である．

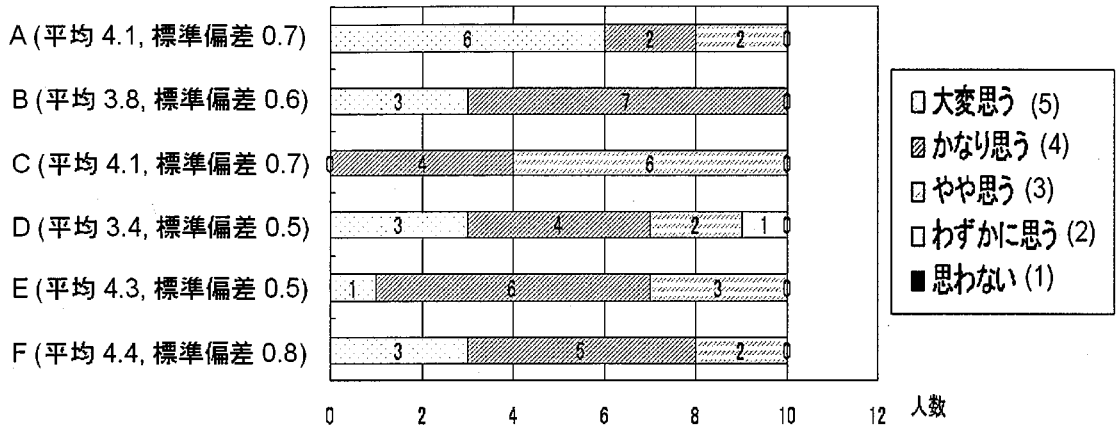


図 3.13: アンケート結果

### アンケート結果

アンケート結果を図 3.13 に示す．アンケートの項目は以下のようにした．

A. マウス操作によるパターン作成は，使いやすいと思うか?

B. インクリメンタルプログラミングによるパターン作成は，使いやすいと思うか?

C. マウス操作とインクリメンタルプログラミングを組み合わせた作成方法は，使いやすいと思うか?

D. 用意したスクリプトの数は十分と思うか?

E. 提案したインタフェースは，効果的と思うか?

F. 提案したインタフェースは，面白いと思うか?

全ての質問は，5 段階で回答してもらった．自由意見として，描いた明滅パターンをドラッグして編集できるといい，スクリプトをボタンで選択できればいい，GUI 環境をもっと充実させてほしいという意見があった．用意したスクリプトについては，もっとおもしろいパターンがあればいいというコメントを得た．一方，提案したインタフェースは効果的と思うかという質問に対して，全員が 4 点（かなり思う）以上であった．また，提案したインタフェースは面白い，直観的にわかりやすい，高度な表現ができるようになった，明滅パターン作成が楽しくなったというコメントを得た．エディタに提示した明滅パターンに対し，明滅の編集作業をスクリプトで実行できることから，直観的な明滅編集が可能となる．上記で示した結果とコメントから，提案したインタフェースは，プログラミング知

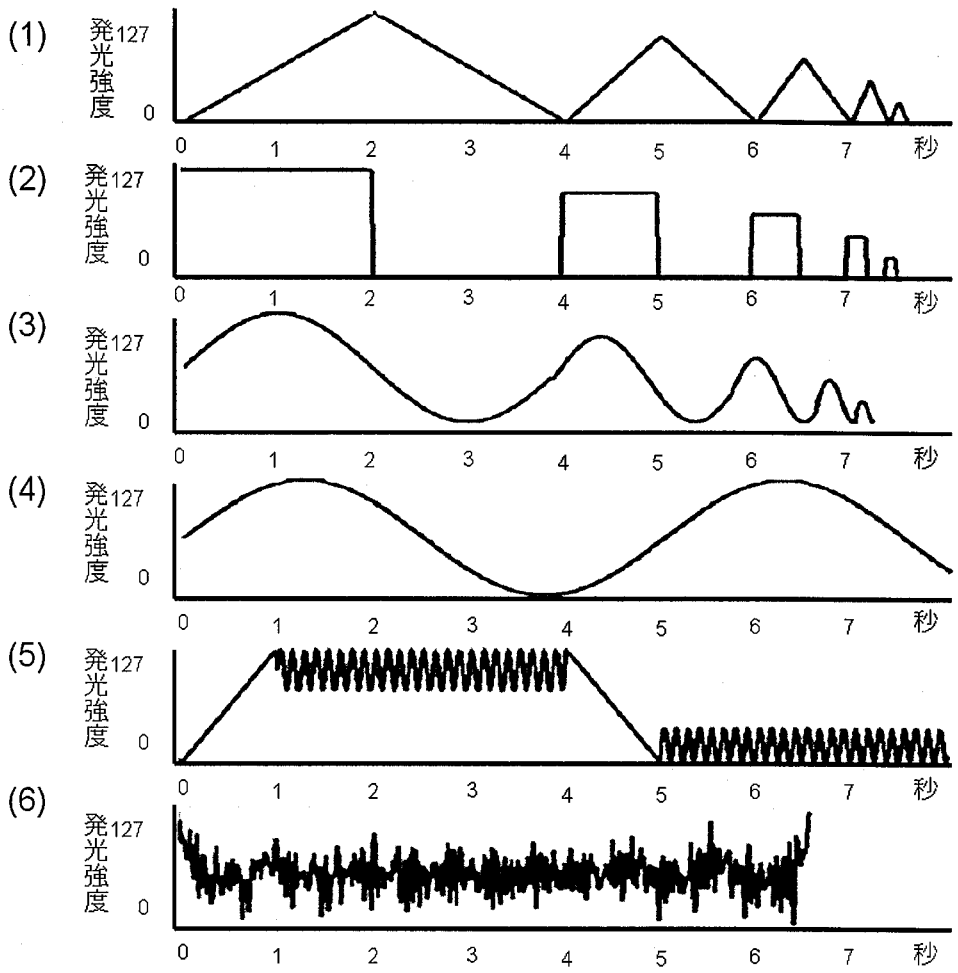


図 3.14: 評価に用いた6つの明滅パターン

識を持つユーザにとって有用性の高いことが示された.

### 3.5.2 圧縮率の比較

6つの明滅パターン（図3.14）を用いて，5つの圧縮方式の圧縮率を比較した．その結果を表3.4と図3.15に示す．圧縮率は，可変周期サンプリングと差分符号化を組み合わせた方式が平均して最も良い.

可変周期サンプリングは（1）～（6）で45.5～64.9％と，平均して55.7％の圧縮率とな

表 3.4: 圧縮率の比較

| 圧縮方式 | 平均値 (%) | 最小値 (%) | 最大値 (%) |
|---|---|---|---|
| 可変周期サンプリング | 55.7 | 45.5 | 64.9 |
| スクリプト解釈 | 49.7 | 8.3 | 104.1 |
| 差分符号化 | 48.0 | 9.3 | 100.0 |
| パレット符号化 | 44.6 | 9.5 | 100.0 |
| 可変周期＋差分符号化 | 31.9 | 8.8 | 45.1 |

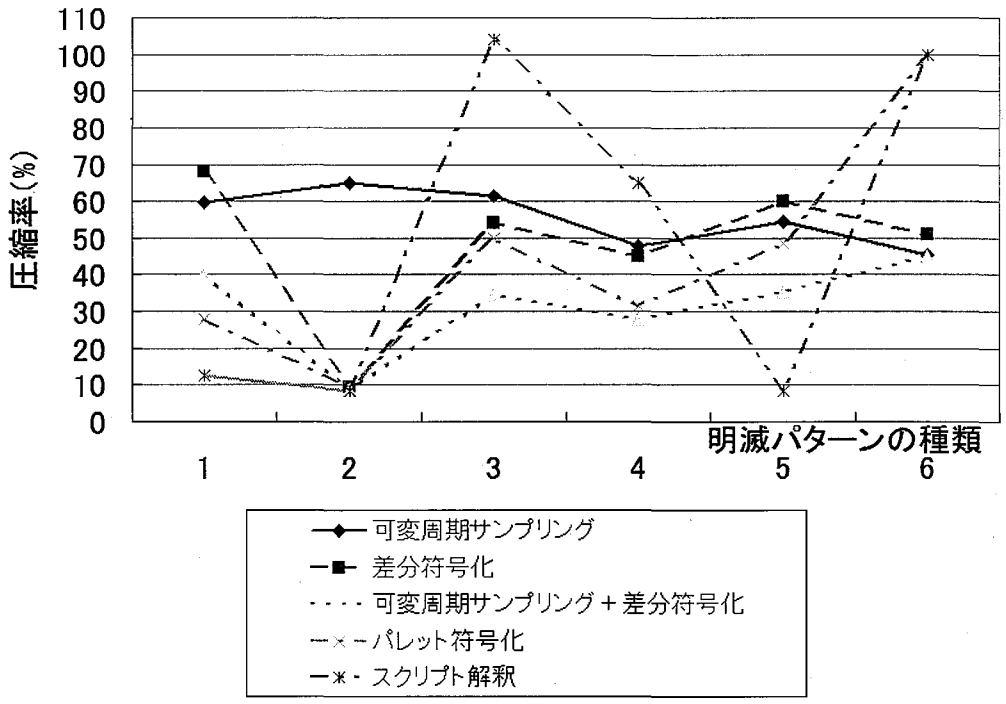


図 3.15: 圧縮率の比較

る．差分符号化は (2) で非常に良い圧縮率となる．しかし，(1) は，データの連続性が失われているため，圧縮率は悪い．可変周期サンプリングと差分符号化を組み合わせることで，(1) ～ (6) 全てにおいて 50 %以下の圧縮率となる．

表 3.5: 必要な読み込み回数

| 可変周期 | 差分符号化 | 可変+差分 | パレット | スクリプト |
|---|---|---|---|---|
| 1回 | 3回 | 3回 | 最高4回 | 最高6回 |

パレット符号化は（1）～（5）のパターンに対して50％以下の圧縮率となったが，(6）に対しては圧縮できなかった．

スクリプト解釈の圧縮率は，明滅パターンの種類に大きく依存する．明滅パターン（2）のとき，その圧縮率は他の圧縮率と比較して最も良くなる．(3）では，周期の繰り返しがないため，無圧縮時よりデータ量が多くなる．(5）では，同じパターンの繰り返しが多いため，圧縮率は良い．(6）では，パターンを無圧縮で保存する．

以上の結果から，可変周期サンプリングと差分符号化を組み合わせた圧縮を利用することで，様々な明滅パターンを，より長く再生することが可能になることが示された．また，明滅パターンを特徴ごとに細分化し，最適の圧縮方法をそれぞれ選択することで，さらに長時間のショーに対応可能となる．

ここで，差分符号化，可変周期サンプリングと差分符号化の組み合わせ，パレット符号化，スクリプト解釈は，同時に制御できるポートの数に制限がある．これは，EEPROMからデータの読み込みに時間がかかってしまうため，PWM周期の13msecの間に復元することができないからである．1つのポートを使用した場合で，圧縮データの復元に必要な1周期内での読み込み回数を表3.5に示す．スクリプト解釈とパレット符号化は，13msecの間でのEEPROM読み込み回数が多いため，1つのポートしか制御できない．差分符号化と可変周期サンプリングと差分符号化の組み合わせは，2つのポートまで同時に制御できる．

### 3.5.3 実運用評価

#### ブレイクダンスパフォーマンス

KOBEルミナリエイベントステージ（2006年12月10日17日，兵庫県神戸市中央区東遊園地噴水広場）で披露したブレイクダンスのズボン（図3.16）に，本システムの導入を試みた．図3.17に編集ソフトウェアの画面を示す．上の段の明滅パターンは，横軸が時間軸，縦軸がズボンのLEDの位置を示している．中断の明滅パターンは上から赤，緑，青の明滅パターンを示し，左クリックしながらマウスで描画することにより作成できる．また

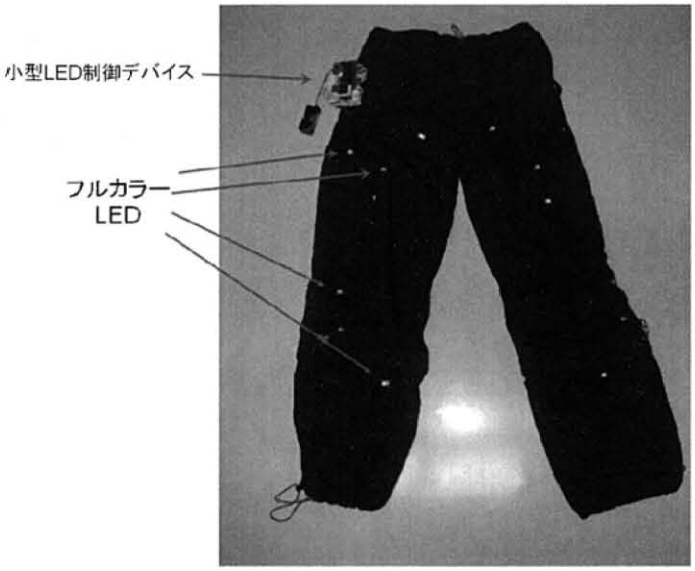


図 3.16: ブレイクダンスに用いたズボン

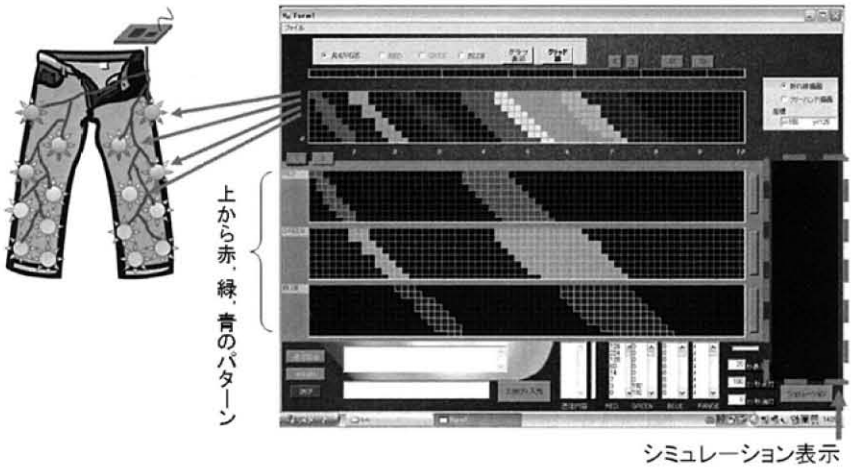


図 3.17: ダンスシステム用編集ソフトウェア

右クリックしながらマウスを動かすことで作成したパターンを消すことができる．作成した明滅パターンはシミュレーション表示部で動作を確認することができる．また時間軸の単位を変更することができる．パフォーマンスの様子を図 3.18 に示す．このパフォーマンスは，バックミュージックと明滅のタイミングを同期させるため，音と明滅のずれが大きく目立ってしまう．インクリメンタルプログラミングにより，“faster” および “slower” のプ

図 3.18: ブレイクダンスパフォーマンスの様子

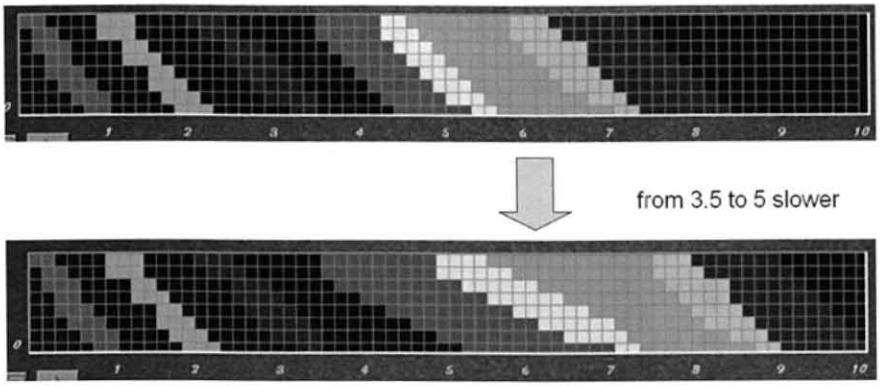


図 3.19: 明滅パターンの編集

ログラムを追加していくことで，作成した明滅パターンのタイミングを細かく編集することができる．明滅パターンの編集の様子を図 3.19 に示す．ここでは "from 3.5 to 5 slower" のプログラムを追加した明滅パターンの変化を示している．

明滅パターンの設計は以下のように行った．

1. 音楽をフレーズごとに分割し，明滅パターンのイメージをフレーズごとに作った．明滅パターンの最初のフレーズは，鼓動に合わせ明滅，消灯，ランダムに明滅，単色のパターンを赤，緑，青と変化，上から光が流れるように明滅，単色のパターンを赤，

緑，青と変化，ランダムと順に変更する明滅パターンとした．

2. マウス描画により，鼓動に合わせた明滅パターンを作成した後，テキストファイルに保存（ファイル名：2-1.txt）し，音楽とタイミングを合わせながらインクリメンタルプログラミングにより編集した後，テキストファイルに保存（ファイル名：2-2.txt）した．ここで使用したスクリプトは “from 7.5 to 8 slower”，“from 9 to 9.5 slower”，“from 10.5 to 11 slower”である．

3. 再度，マウス描画により鼓動に合わせた新規の明滅パターンと消灯のパターンを作成した後，テキストファイルに保存（ファイル名：2-3.txt）し，音楽とタイミングを合わせながらインクリメンタルプログラミングにより編集した後，テキストファイルに保存（ファイル名：2-4.txt）した．ここで使用したスクリプトは “from 0 to 2 cut”，“from 17 to 18 cut”，“from 16 to 17 cut”である．

4. ランダムの明滅パターンをマウス描画により作成し，テキストファイルに保存（ファイル名：2-5.txt）した．

5. 単色のパターン（赤，緑，青）と光が流れるパターンと単色のパターン（赤，緑，青）をマウス描画により作成し，テキストファイルに保存（ファイル名：2-8.txt）した．

6. 2-5.txt，2-8.txt，2-5.txt を組み合わせ，そのパターンをテキストファイルに保存（ファイル名：2-9）し，音楽とタイミングを合わせながらインクリメンタルプログラミングにより編集した後，テキストファイルに保存（ファイル名：2-10）した．ここで使用したスクリプトは “from 0 to 1 cut”，“from 10 to 11 slower”，“from 12 to 15 repeat”である．

7. 2-4.txt と 2-10.txt を組み合わせた後，インクリメンタルプログラミングにより編集を行った．以下同様に，フレーズごとにパターンをマウスで描画した後，編集を行い組み合わせるという手順を繰り返した．

ここでは，インクリメンタルプログラミングによる編集を行う前にテキストファイルに保存することで，編集前の明滅パターンを再度編集した．しかし，“undo”のスクリプトにより追加したスクリプトの取り消しを行うことで明滅パターンの再編集は容易になる．特に “cut”のスクリプトは編集前の明滅パターンに戻すスクリプトがないため，“undo”の機

能が必要である．また，“faster”のスクリプトを追加した後，編集部分に対し“slower”のスクリプトを追加した場合，パターンがなまるという問題があるため，“undo”で取り消しを行い，編集前の明滅パターンに戻したほうが良いと考えられる．

また，この実運用経験を通じて，以下のようなハードウェアに関する問題点が明らかになった．

- 激しい動きによりLEDとデバイスをつなぐ部分がすぐに切れる．
- プログラムが一度初期化されると音との同期が修正不可能となる．
- パフォーマンス開始時のスイッチを押すタイミングにより音との繊細な同期が左右される．

このように，配線に十分な配慮をしているにも関わらず，激しいダンスに耐え切れずに配線が切れてしまったり，衝撃によって接触不良が起こり，プログラムが初期化されるなどのトラブルが多数あった．初期化されるというトラブルに関しては，電解コンデンサを取り付けることにより初期化される頻度を減少でき改善した．

今回のパフォーマンスについて20代から70代の23人（男性19人，女性4人）にアンケートを行った．アンケートの回答を一部抜粋して以下に考察を示す．

- 映像，音楽，ダンス，LEDとのコラボレーションが良かった（多数）．
- LEDを使うことでダンスの動きが協調されてパフォーマンスがとても派手になっていた（20代男性）．
- ストリートダンスが本格的であり，素早い動きにより残像が美しかった（50代男性）．
- 暗闇の中から突如点灯させるといった方がパフォーマンスを行う場合には良い（20代男性）．
- 足の動きが際立って見えるので良かった（多数）．
- もう少しLEDの数を増やせばよいと思う（20代男性）．
- 断線によるシステムの不調が目立ったのが残念（多数）．
- 光に注目がいってしまい，ダンスの動きがわかりづらかった（20代男性）．

- 夜であり，照明も薄暗かったのでステージが暗かった（70代女性）.
- 高度な技術は要求されていない．それよりも失敗のないパフォーマンスを追及するべき（50代男性・20代男性）.

このようにダンスズボンを装着したダンサーは，アクロバティックな動きをすることにより，LEDの残像を効果的に利用したパフォーマンスを披露することができた．ダンサー自身が思い描いていた音とダンスの動きにLEDの明滅を組み合わせることにより，表現の幅を広げることができた．しかし，光に注目がいってしまい，ダンスの動きがわかりづらかったという意見から，ダンスの動きを十分に生かした明滅パターンとなっていなかった．より良いパフォーマンスを実現するために，ダンサーの動きを考慮した明滅パターンの設計ができる仕組みを構築することが重要であることがわかった．

**服飾ファッションショーでの作品**

上田安子服飾専門学校のファッションショー（2006年1月21日，大阪厚生年金会館大ホール）で披露したウェアラブルコンピューティング作品に，本システムを導入した．明滅パターンは，上田安子服飾専門学校の学生3名が本システムのインタフェースを用いて作成した．明滅パターンの長さは1分30秒であった．ファッションショー後，制作者にアンケートをとったところ，プログラムを組まないで明滅パターンを制御できるところがいい，明滅パターンの制御時間は十分である，出来上がりに満足できたといったコメントを得た．しかし，明滅パターン作成に時間はかからなかったが，インタフェースの操作方法などを理解してもらうのに，プログラミング知識を持つ人と比較して時間がかかった．この問題は，スクリプトをボタン操作で選択できるようにするなど，GUIによる操作を強化する方法が有効であると考えられる．

**ゆらぎ提灯**

IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education のバンケット（2005年11月29日，徳島）で披露したゆらぎ提灯（図3.20）に，本システムを導入した．ゆらぎ提灯は，フルカラーの高輝度LEDを3つ用いて作成し，和紙による光の拡散を利用することで，やわらかい炎のゆらぎを表現する．ゆらぎ提灯は，阿波踊りのパフォーマンスで10分程度利用された．明滅パターンは，$1/f$ フィルタを用いて作成した．作成した明滅パターンは，無圧縮では48960バイト必要であり，32KバイトのEEPROMには保存することができない．可変周期サンプリングと差分符号化を組み合わせた圧縮を用いることで，明滅パターンを17400バイトにまで圧縮し，より長い明滅パターンを保存

図 3.20: ゆらぎ提灯

できることを確認した.

## 3.6 関連研究

Hearwear [33], bYOB [58], Memory Rich Clothing [4] はセンシングにより，光と環境とのインタラクションを実現している．Hearwear は，環境音をセンシングし光をアクチュエートしている．bYOB は，ユーザが財布や傘を鞄に入れ忘れていることを光により提示する鞄である．Memory Rich Clothing は，物理的なインタラクションの親密性を記憶し光の模様を表現する．Bloom Accessory [42] は，無線で光り方を操作できるアクセサリについて提案している．これらはファッションの一部として明滅が利用されているが，明滅は単純なパターンが多い．提案システムを用いることで，明滅デザインの自由度の幅を広げ，表現力を向上させることが可能である．

Electronic Textile は，デバイスを従来の衣服と同様にフレキシブルかつ快適に装着することを目的とした生地であり，ウェアラブルコンピュータのファッション性に関する研究 [5] がある．Electronic Textile のための構築キット [7] は，プロトタイプシステムを制作するためのツールであり，wearable LED display，LED sequin shirt，LED bracelet を簡単に制作することを可能としている．この構築キットはハードウェアに重点を置いた研究であり，ソフトウェアは従来の開発ツールと C 言語を用いている．また，独自のプログラミング方式と開発環境については，今後の課題としている．

LED を用いた装着型デバイス [39] は，照度，温度，地磁気といった各種センサと LED を利用し，動作や意思のコミュニケーションを実現するシステムである．VCC [40] は LED を用いたマーカーであり，位置情報や任意の情報をウェアラブルコンピューティング環境で提示するシステムである．IDCam [53] は，高速に LED が点滅するビーコンを用いることでユーザに情報を提示する．これらは新たなコミュニケーションや情報伝達の可能性を持つが，ユーザが自由に明滅を制御することはできない．

特定のハードウェア専用の一般ユーザ向けのアプリケーション開発環境である LEGO 社の MINDSTORMS [44] や，バンダイ社の ROBOT WORKS [2] は，条件や動作を記述したブロックをつなげることで簡単にプログラミングができる．計算機音楽記述用言語である MAX[52] は，様々な処理を表現する矩形ノードを線で結ぶことによって音楽信号を生成する．これらはグラフィカルな表現を活用したビジュアルプログラミングであり，非技術者にも使いやすいという利点があるが，明滅設計のような細かい編集を繰り返す場合には適さない．

松下電工の RGBPRO [54] は，家庭や店舗における固定型調光システムである．演出パターンの選択やテンポのアップダウンが簡単なダイヤル操作で可能だが，アート表現で求められる明滅を実現するための細かい編集は考慮されていない．

非技術者を対象とした教育用プログラミング言語として LOGO[45], Crickets[8], Scratch[47] がある．LOGO は LISP の設計思想を土台にタートルと呼ばれるカーソルを基準点とした相対座標で作図を行う．Crickets は小型デバイスにライトやモータやセンサを接続し，回転，点灯，音楽再生といった動作をプログラミングすることができる．Scratch はパズルのようなピースを組み合わせることでプログラムの構文を作成していくビジュアルプログラミングであり，アニメーション，ゲーム，インタラクティブアートを作成することができる．これらは，非技術者の教育用に作られたものであり，アート表現に求められる細かい明滅表現の編集に特化したものはない．

エレクトリックジュエリーワークショップ [67] は，子供たちが電子アクセサリーの制作を通じて感性，工学や科学について学ぶための MIT メディアラボ [48] で行われているワークショップである．CODACHROME[10] はエレクトリックジュエリーの明滅を作成するための編集ソフトウェアである．CODACHROME はカラーパレットをマウス操作することで明滅パターンを作成することができるが，子供たちの創作活動を支援することを目的として作られているため，複雑な明滅パターンの作成や細かい編集は考慮されていない．本章

で提案する方式を用いることで，より表現力の高い明滅パターンの設計が可能になり，より高度な支援が可能になると考える．

## 3.7 むすび

本章では，明滅パターン作成・再生のための制御システムを提案した．提案システムは，明滅作成のためのインクリメンタルプログラミングと，明滅パターンの圧縮の機能を有する．これにより，長時間の明滅パターンを作成，編集，保存することが容易になった．また，イベントなどでの実運用経験とインタフェースの評価実験について本システムの有効性を示した．明滅設計者のための提案システムは，デザインの自由度を向上させることにより，これまでのインタフェース設計に大きく関与していなかった芸術的分野の人達の創造的活動を支援することを可能とし，より表現力の高い明滅表現が制作されると考える．

# 第4章

# 明滅連携作成方式

## 4.1 まえがき

LEDをパフォーマンスに用いる場合，複数の演者の手足や服に付いたLEDを連携させることで，様々な電飾パフォーマンスが可能となる．例えば，阿波踊りにて複数の演者の提灯，小手，爪などに電飾を付け，それらの明滅を連携させることで様々な表現が可能となる．ここでは，パフォーマンスの表現力を向上させるために，常に同期した明滅を表現するのではなく，タイミングをずらしたり，徐々に連携する電飾の数を変化させたりと変化をつけることが重要である．

第3章で提案したインクリメンタルプログラミングにより，単独デバイスの編集の繰り返しが容易になり，ユーザが明滅作成の試行錯誤をしやすくなった．しかし，複数デバイスを連携させる場合には，各々のデバイスの動作が異なる場合，試行ごとに各々のデバイスを書換える必要がある（図4.1）．例えば，図4.2のように，15人のダンサーがLEDの付いたズボンを穿いてパフォーマンスを行う場合，ダンサーは常時激しい動きを行うため，演技中にはスイッチなどによる明滅パターンの切り替えは行わず，演技開始とともに一定の明滅パターンを再生する必要がある．ここで，ショーの前半ではダンサー15人が同じ明滅パターンを再生するが，ショーの後半では表現力を高めるために明滅のタイミングをずらして光が流れる様子を表現したいものとする．このとき，明滅パターン実装における1回目の試行で，左のダンサーから光の色を0.5秒ごとに変えていく連携動作を15個のデバイスに実装したものとする．しかし，実際に明滅させて連携動作の全体的な様子を見た結果，色の変化をもっとゆっくりにしたいという要求があった．その場合，2回目の試行で，

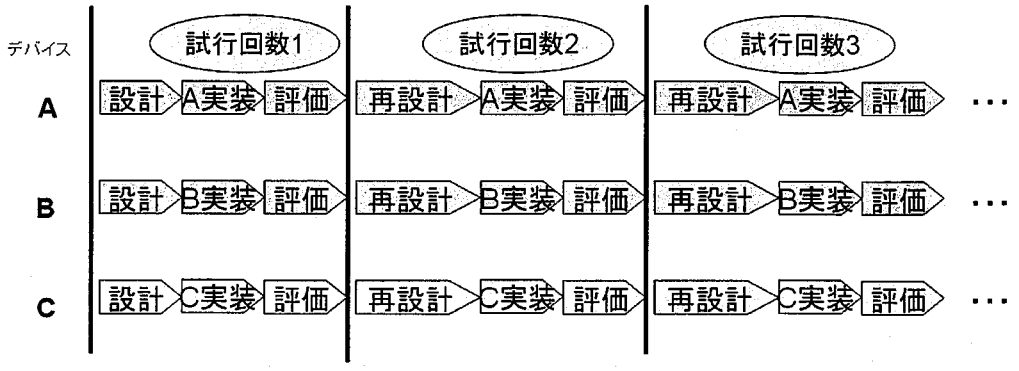


図 4.1: 連携動作の作成モデル

色の変化を1秒ごとに編集した明滅パターンを15個のデバイスに再実装する必要がある．さらに全てのデバイスに明滅パターンを実装した後，全体的な様子を見ると色の変化するタイミングに緩急をつけたいといった新しい要求が出てくることがある．その場合，3回目の試行で動作変更が必要なデバイスの再実装を行わなければならない．連携するデバイスの数が多いほどパフォーマンス全体としての表現力は向上するが，明滅設計者にとってはデバイスの数が増加するにつれ編集作業の負荷が大きくなるという問題がある．

そこで本章では，複数デバイスの連携動作作成時における設計者の負荷を軽減するために，インクリメンタルプログラミングを用いた明滅連携動作の書換え方式を提案する．

以下では，第4.2節で，本章で提案する明滅連携作成方式の要求事項について述べる．第4.3節では，提案方式の設計について述べ，第4.4節では実装について説明する．第4.5節では提案方式の評価について示す．第4.6節で関連研究について説明し，最後に第4.7節で本章のまとめを行う．

## 4.2 要求事項

本節では，明滅連携作成方式の要求事項として，様々な物や場所に設置したLEDの連携動作モデル，インクリメンタルプログラミングの設計モデルに適した書換え方式，デバイス全体の整合性の保持について述べる．

- **連携動作モデル**

連携するLEDの数や連携するタイミングをユーザが細かく編集することで様々な表

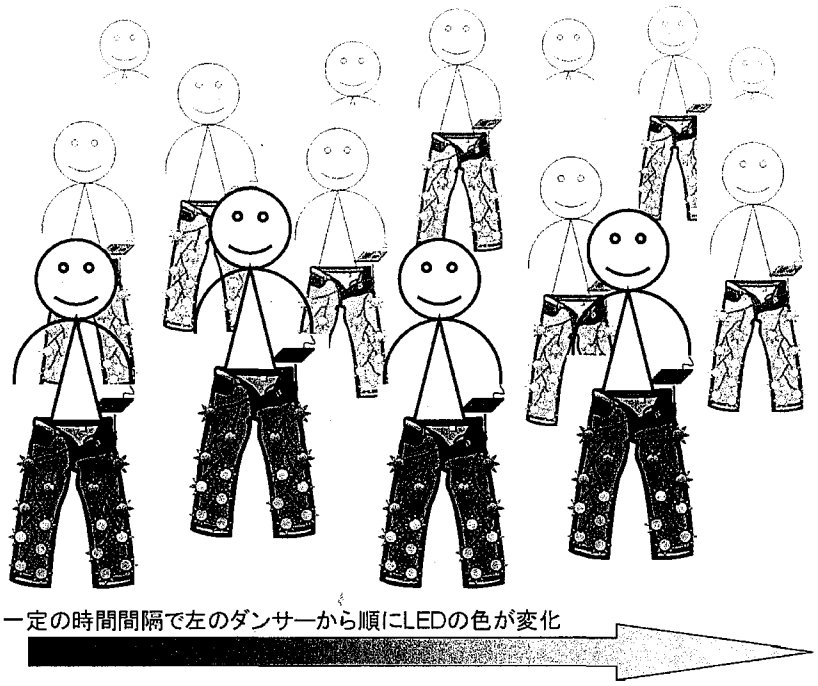


図 4.2: 連携動作の様子

現が可能となる．ユーザが編集ソフトウェア上で複数のデバイスの動作を把握し，デバイスの並列動作を編集する方式が求められる．

- **書換え方式**

インクリメンタルプログラミングを用いて明滅を設計する作業は，編集を繰り返す作業と全体の構成を組み立てる作業に分割される．編集は，明滅パターンの実装・評価・再設計を繰り返すため，迅速にデバイスの動作を書換える方式が求められる．一方，全体の構成を組み立てる場合は，PC 上で構成を作成した後，一括してデバイスの動作を書換える方式が有効である．

- **全体の整合性**

複数のデバイスの動作を細かく編集する場合，一部のデバイスが起動していないなどの理由で全体として整合性が保てなくなる場合がある．その場合，起動していないデバイスを再起動させ，もう一度編集作業を繰り返す必要がある．そこで，ユーザが意識することなくデバイス全体の整合性を維持できる仕組みが必要になる．

## 4.3 設計

本研究では，特定の範囲内における様々な物や場所に数十個の小型LED制御デバイスが配置されている状況を想定する．小型LED制御デバイスは，他の小型LED制御デバイスと無線通信を行い，光の連携動作を実現する．本節では，前節で述べた要求事項を満たす明滅連携作成方式の提案を行う．提案方式では，PC上で連携動作作成用に拡張したインクリメンタルプログラミングを実行し，小型LED制御デバイス上で差分更新を実行する．

- PC上での処理

  PC上で，ユーザがプログラムを追加するたびに，エディタ上に表示された連携動作のグラフを変更し，小型LED制御デバイスにコマンドを送信する．これにより，ユーザは全体的な連携動作をグラフで視覚的に把握しながら，動作設計を段階的に行うことができる．

- 小型LED制御デバイス上での処理

  小型LED制御デバイス上では，コマンドを受信するたびに，保存している連携動作を編集する．これにより，プログラムの変更を迅速に小型LED制御デバイスに反映する．

インクリメンタルプログラミングの設計モデルが，細かい編集作業と全体を構成する作業の2つに分かれていることから，提案方式ではPC上のインクリメンタルプログラミングと小型LED制御デバイス上の差分更新を組み合わせて，以下の2つの書換え型を実現する．

- 全書換え型

  小型LED制御デバイス上ではインクリメンタルプログラミングを行わず，PC上だけでインクリメンタルプログラミングを行い連携動作を作成した後，全ての小型LED制御デバイスの動作を一括して書換える．PC上で全体的な構成を作成および編集してから，一括して小型LED制御デバイス全体の動作を新規に書換えることができる．

- 差分書換え型

表 4.1: 全書換え型と差分書換え型の違い

| PC 上 | 小型 LED 制御デバイス上 | 書換え型 |
|---|---|---|
| 通常プログラミング | プログラム実装 | 従来型 |
| インクリメンタル | 全体更新 | 全書換え型 |
| プログラミング | 差分更新 | 差分書換え型 |

PC 上と小型 LED 制御デバイス上で，同時にインクリメンタルプログラミングを行い，迅速に連携動作を書換える．さらに，小型 LED 制御デバイス間の整合性を保つために，小型 LED 制御デバイス同士でプログラムの差分をコピーし，プログラムの変更を反映させる．差分書換え型は，全書換えを行った後での細かい編集に有効である．

全書換え型と差分書換え型における処理の違いを表 4.1 に示す．

### 4.3.1 PC 上でのインクリメンタルプログラミング

提案方式では，明滅パターンと連携の状態を別々のスクリプトで編集する．これにより，明滅の波形と連携の状態それぞれを独立して編集することが可能となる．明滅パターンを編集するプログラムを明滅波形編集用プログラム，連携の状態を編集するプログラムを連携編集用プログラムと呼ぶ．

明滅波形編集用プログラムは，次のように記述する．

$\underline{\text{from } t1 \text{ to } t2}$ $\underline{c}$

時間区分　編集コマンド

$t1$ は時間区分の開始を示し，$t2$ は時間区分の終了を示す．編集コマンド $c$ は，明滅データの編集に有効と考えられる darker，brighter，slower，faster，repeat，half，skip の 7 種類を用意した．skip 以外は一定の割合で，元のプログラムを変化させる．

連携編集用プログラムは，ある時間区分における連携の状態と光の色を，次のように記述する．

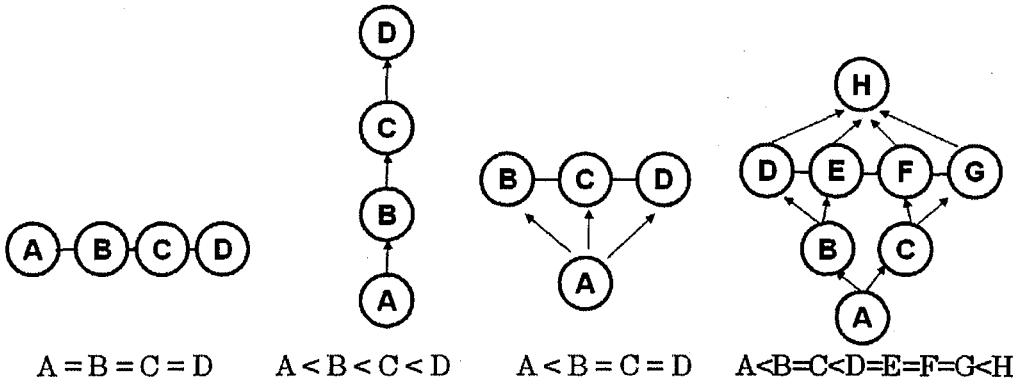


図 4.3: 連携動作のパターン

from $t1$ to $t2$ link *color* $f$
時間区分　　色　連携式

連携式 $f$ は，デバイス間の半順序関係を記述する式で，小型 LED 制御デバイスの ID と，記号 “=”，“<”を組み合わせて記述する．A = B は A と B が同期することを表し，A < B は A と B が連携し A が B より早いタイミングで動作することを表す．図 4.3 は連携動作の例を示したものである．A，B，C，D は小型 LED 制御デバイスの ID を表す．$f$ を A = B = C = D とした場合は，4 つのデバイスが同期する．A < B < C < D とした場合は，A，B，C，D の順に動作のタイミングをずらして連携する．図 4.3 の矢印は，発光強度が上がるにつれ連携しだす小型 LED 制御デバイスの関係を示し，実線は小型 LED 制御デバイスが同期することを示す．このように “=” と “<”を組み合わせることで，多様な連携動作を実現する．

### 4.3.2 小型 LED 制御デバイス上での差分更新

全書換え型の場合，小型 LED 制御デバイスは，PC から送られる全ての明滅データと動作データを保存するため，差分更新を行わない．一方，差分書換え型の場合，小型 LED 制御デバイスは，PC から送られてくるコマンドを受信し，差分更新を行う．ユーザが PC

から明滅波形編集用プログラムを入力する度にPCからコマンドが送信され，各々の小型LED制御デバイス側で動作を書換えることで，プログラムの変更を迅速にデバイスに反映できる．しかし，コマンド送信時に一部の小型LED制御デバイスが起動していない場合，連携動作の整合性が保てなくなり，ユーザがコマンドを再送信しなければならない．そこで，小型LED制御デバイス同士でオンラインコピーを実現する必要性が生じる．以下ではオンラインコピーの方法について述べる．

オンラインコピーは，小型LED制御デバイス同士が連携動作しながら，明滅データ編集用プログラムをコピーする手法である．その際，コピーされた明滅波形編集用プログラムをメタプログラムとよぶ．小型LED制御デバイス内で，メタプログラムからバイトコード型プログラムを作成する．バイトコード型プログラムは，明滅データの更新・挿入・削除を行うプログラムであり，バイトコードで保存される．生成されたプログラムに従い，明滅データの書換え処理を実行する．メタプログラムにはコードバージョンが付加され，ユーザの入力順に逐次プログラム生成処理を実行する．ここではあらかじめメタプログラムの送信用小型LED制御デバイスを一つ設定しておく．以下に，オンラインコピーのステップを示す．

**ステップ1：** 連携動作しながら，送信用小型LED制御デバイスから受信用小型LED制御デバイスにメタプログラムを送信する．

**ステップ2：** 送信用で保持しているメタプログラムのコードバージョンと，各々の受信用で保持しているメタプログラムのコードバージョンが一致しない場合，次に実行すべきメタプログラムをコピーする．

**ステップ3：** コピーしたメタプログラムからバイトコード型プログラムを生成する．

**ステップ4：** バイトコード型プログラムを実行し，明滅データを書換えた後，ステップ1に戻る．

メタプログラムから生成されるバイトコード型プログラムを図 4.4から図 4.6に示す．“from $t1$ to $t2$ darker”は，指定した区間のデューティ比を3/4にし，“from $t1$ to $t2$ brighter”は，指定した区間のデューティ比を4/3にする．“from $t1$ to $t2$ skip”は，指定した区間を削除する．“from $t1$ to $t2$ repeat”は，指定した区間の波形を繰り返す．“from $t1$ to $t2$ faster”は，指定した区間のテンポを2倍に速くし，“from $t1$ to $t2$ slower”は，指定した区間のテンポを2倍に遅くする．バイトコード型プログラムは，EEPROMに保存されている明滅パターンの編集を行う．read_ext_rom（A, I），write_ext_rom（A, J）は独自の関数で，外

```
// from x1 to x2 darker から生成されるプログラム
FOR I=x1 TO x2
read_ext_rom(A,I)
A=A/4*3
write_ext_rom(A,I)
NEXT
END

// from x1 to x2 brighter から生成されるプログラム
FOR I=x1 TO x2
read_ext_rom(A,I)
A=A/3*4
write_ext_rom(A,I)
NEXT
END

// from x1 to x2 skip から生成されるプログラム
J=x1
FOR I=x2 TO last
read_ext_rom(A,I)
write_ext_rom(A,J)
J=J+1
NEXT
```

図 4.4: バイトコード型プログラムの例1

部記憶装置であるEEPROMのI番地のデータを読み込み，J番地に保存する．*last*は明滅データの最終番地を表す．メタプログラムは，EEPROMの0番地から保存していく．バイトコード型プログラムは，EEPROMの200番地以降にバイトコードで上書きしていく．以下に，バイトコード型プログラムのフォーマットを示す．

**FOR I=y1 to y2**

5バイト使用する．1バイト目の上位4ビットをコマンドID，下位4ビットを変数番号とす

```
// from x1 to x2 repeat から生成されるプログラム
J=last
K=last+((x1+x2)/2)
FOR I=x1 TO last
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,K)
J=J - 1
K=K - 1
NEXT
END

// from x1 to x2 faster から生成されるプログラム
J=x1
FOR I=x1 TO ((x1+x2)/2)
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,I)
J=J+2
NEXT
FOR J=x2 TO last
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,I)
I=I+1
NEXT
END
```

図 4.5: バイトコード型プログラムの例 2

る．変数番号は，16 個の long 型の変数 A〜P を指定する番号である．y1，y2 ともに 2 バイト使用する．

**NEXT I**

1 バイト使用する．上位 4 ビットをコマンド ID，下位 4 ビットを変数番号とする．

**I=y3 or I=I+y3 or I=I-y3**

```
// from x1 to x2 slower から生成されるプログラム
J=last
K=last+((x1+x2)/2)
FOR I=x2 TO last
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,K)
J=J - 1
K=K - 1
NEXT
J=x2
FOR I= x1 TO x2
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,K)
K=K - 1
read_ext_rom(A,J)
write_ext_rom(A,K)
J=J - 1
K=K - 1
NEXT
END
```

図 4.6: バイトコード型プログラムの例 3

3バイト使用する．1バイト目の上位4ビットをコマンドID，下位4ビットを変数番号とする．y3で2バイト使用する．

**read_ext_rom（A, I）**

**write_ext_rom（A, J）**

2バイト使用する．1バイト目の上位4ビットをコマンドID，5ビット目をフラグとする．2バイト目の上位4ビットをread_ext_romの変数番号，下位4ビットをwrite_ext_romの変数番号とする．フラグが立っている場合は，全部で3バイト使用する．3バイト目の上位4ビットを分母，下位4ビットを分子とする乗算を，read_ext_romとwrite_ext_romの間で行う．

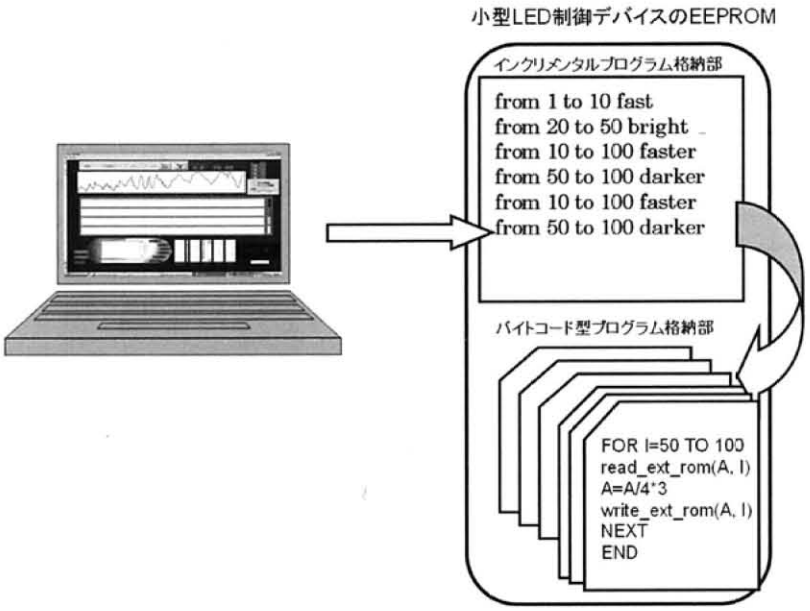


図 4.7: メタプログラムの保存とバイトコード型プログラムの作成

PC から送られてくるメタプログラムは，小型 LED 制御デバイス同士の整合性を保つために履歴を保存するが，バイトコード型プログラムは履歴を残さず，同じメモリ領域に上書きしていく．図 4.7 に，PC からコマンドを 6 回送信した場合のメタプログラムとバイトコード型プログラムの保存状態を示す．PC からコマンドが送られてくる度にメタプログラムの保存，バイトコード型プログラムの生成，バイトコード型プログラムの実行を行う．この間，PC からのコマンド受信は行わない．バイトコード型プログラムにより明滅の波形を編集した後，PC からのコマンドを受け付け一連の動作を繰り返す．ユーザの操作で全書換えが行われたときは，PC 側でこれまで送信したメタプログラムの履歴を保存し，小型 LED 制御デバイス側ではメタプログラムの履歴を初期化する．

無線フォーマットは，1 パケット 1 バイトとする．上位 3 ビットをコマンド ID，下位 5 ビットをデータとする．表 4.2 にコマンド ID とデータ内容を示す．明滅データ編集用プログラムのコマンド ID の中で，5 ビット目をフラグとする．明滅データ編集用プログラムからバイトコード型プログラムが生成された場合フラグを立て，1 つの明滅データ編集用プログラムにつき，一度しかバイトコード型プログラムを生成しない．

表 4.2: 通信プロトコル

| コマンド ID | データ内容 |
|---|---|
| 111 | 明滅パターンのアドレス（上位5ビット） |
| 110 | 明滅パターンのアドレス（下位5ビット） |
| 001 | 明滅データ編集用プログラムのコマンド ID |
| 000 | 明滅データ編集用プログラムのコードナンバー |
| 010 | from x1（上位5ビット） |
| 011 | from x1（下位5ビット） |
| 100 | to x2（上位5ビット） |
| 101 | to x2（下位5ビット） |

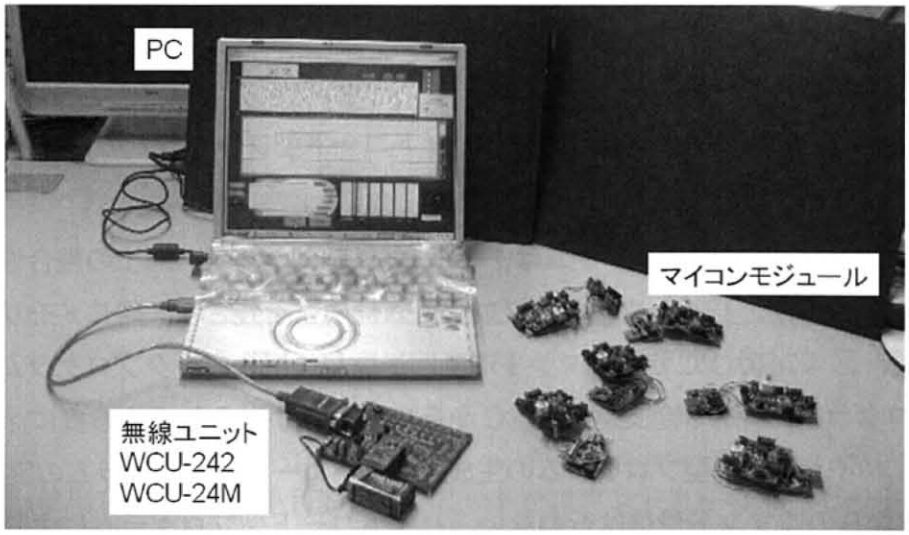


図 4.8: 全体の機器構成

## 4.4 実装

### 4.4.1 全体構成

本システムの全体の機器構成を図 4.8 に示す．PC 側には無線通信ユニット（WCU-24M と WCU-241[38]）がシリアル-USB 変換ケーブルで接続されている．PC 上のソフトウェアの開発は，Windows XP 上で Microsoft Visual Basic.NET 2003 を用いた．PC と小型 LED

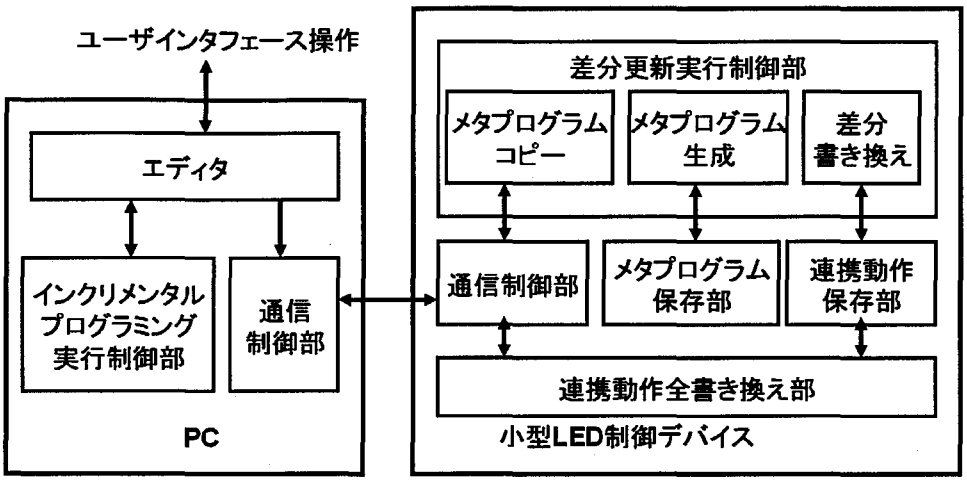


図 4.9: アプリケーション構成

制御デバイスのアプリケーション構成を図 4.9 に示す．PC のエディタではマウス描画およびスクリプトの追加を行い，連携動作をユーザが作成する．スクリプトが追加されたとき，インクリメンタルプログラミング実行部が連携動作の編集を行い，連携動作のグラフを書換える．また，差分書換え実行時にスクリプトが追加されたときには，PC 上でインクリメンタルプログラミングを行うと同時に，小型 LED 制御デバイスと通信制御部でコマンドの送信を行う．コマンドを受信した小型 LED 制御デバイスは，メタプログラムコピー部でメタプログラムのコードナンバーのチェックと保存を行う．メタプログラム生成部では，メタプログラムからバイトコード型プログラムを生成する．差分書換え部では，バイトコード型プログラムを実行し，明滅データの更新・挿入・削除を行う．一方，ユーザ操作により全書換えが実行されたとき，小型 LED 制御デバイスは連携動作全書換え部で連携動作の一括書換えを実行する．

### 4.4.2 小型 LED 制御デバイス

小型 LED 制御デバイスは，外部記憶装置に明滅データと動作データ（図 4.10）を格納する．前者の明滅データは発光強度 0〜127 で表され，明滅パターンの再現に用いる．後者の動作データは明滅の色情報，他の小型 LED 制御デバイスに関する情報からなる．明滅データの総量（2 バイト），明滅データ，終了フラグ（1 バイト），連携データ，終了フラグ（1 バイト）の順に，外部記憶装置へ格納する．図 4.11 に連携式 D ＜ C ＜ B ＜ A からなる連

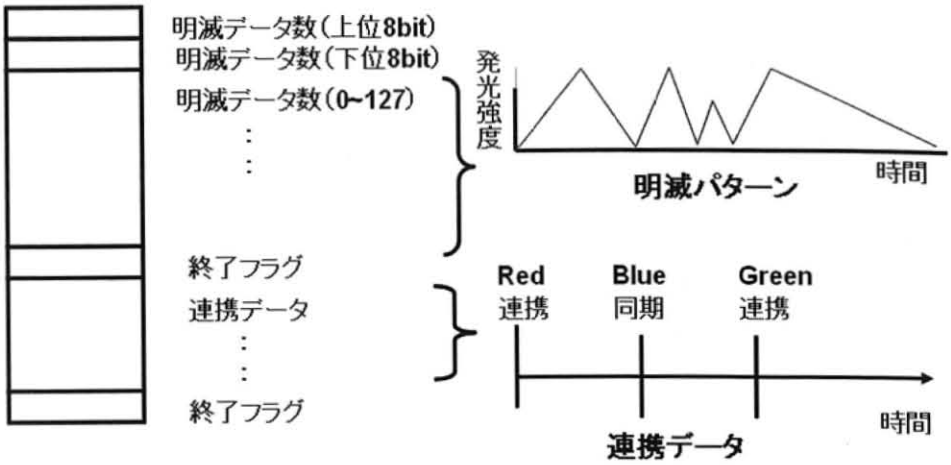


図 4.10: 明滅データと動作データ

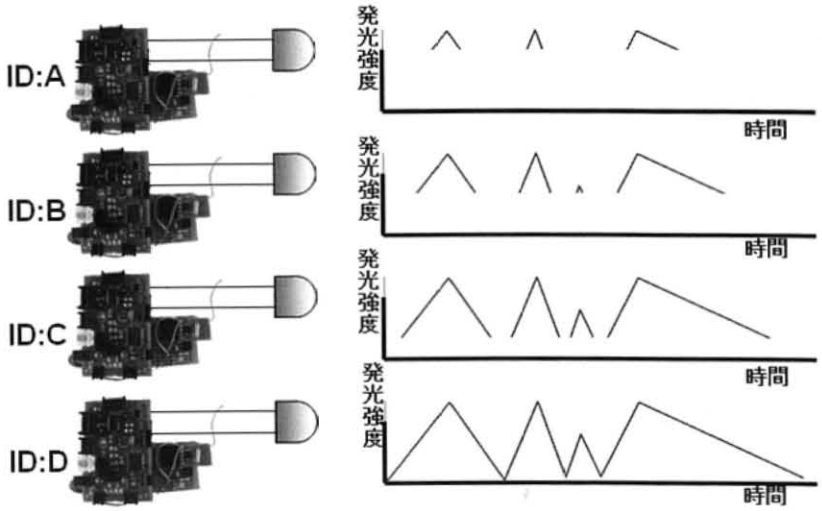


図 4.11: 連携の仕組み

携の例を示す．連携するデバイスは，共通の明滅パターンを保持し，上位の連携 LED 数と下位の連携 LED 数を把握することにより，明滅させる領域を変化させて連携動作を表現する．そのため，各々の小型 LED 制御デバイスが上位の小型 LED 制御デバイス連携数と下位の小型 LED 制御デバイス連携数（表 4.3）を把握する必要がある．デバイス A では上位連携 LED 数が 0 で，下位連携 LED 数が 3（デバイス B，C，D の LED の数）のため，明滅

表 4.3: 各システムが持つ情報

| ID | 上位 LED 数 | 下位 LED 数 |
|---|---|---|
| A | 0 | 3 |
| B | 1 | 2 |
| C | 2 | 1 |
| D | 3 | 0 |

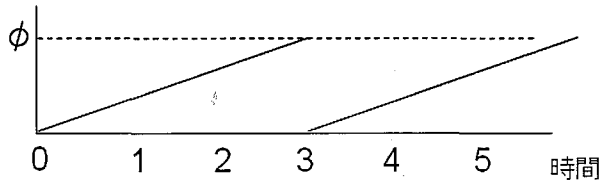


図 4.12: 連携動作の位相関数

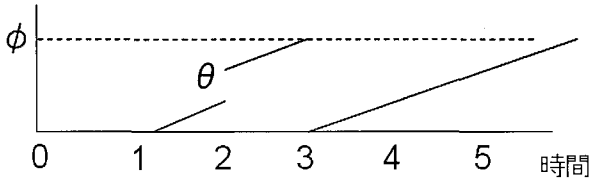


図 4.13: 受信時における連携動作の位相関数

パターンの最大発光強度から 1/4 の領域を再生する．デバイス B では上位連携 LED 数が 1（デバイス A の LED の数）で，下位連携 LED 数が 2（デバイス C，D の LED の数）のため，明滅パターンの最大発光強度から 1/2 の領域を再生する．同様にデバイス C，D の明滅させる領域を決定することで，明滅の発光強度が強くなるにつれ明滅するデバイスの数を増加させる連携動作を表現することが可能となる．

小型 LED 制御デバイスの連携動作は 1 対多通信で実現する．送信用デバイスをあらかじめ 1 つ設定し，他を受信用デバイスと設定する．送信用デバイスは，受信用デバイスに明滅データのアドレスを送信し，連携動作を実現する．小型 LED 制御デバイスは，一定周期

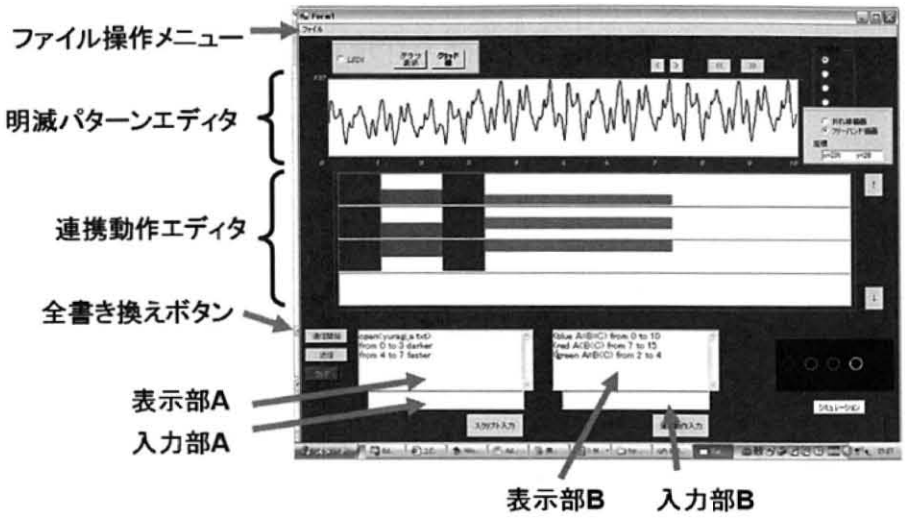


図 4.14: 編集ソフトウェアの画面

の動作を繰り返すため，位相関数で表現でき，$\phi$を超えると初期化される（図 4.12）．受信用小型 LED 制御デバイスが，パケットを受信した場合，位相を$\theta$ずらす（図 4.13）．

### 4.4.3 PC 上のエディタ

PC でのエディタは，図 4.14 の編集ソフトウェアを用いて連携動作の作成・編集を行う．明滅パターンエディタでは，明滅パターンをマウスで描画することができる．入力部 A に明滅波形編集用プログラムを入力することで，明滅パターンエディタ上のグラフを書換え，小型 LED 制御デバイスにコマンドを送信し，差分書換えを行う．表示部 A では，明滅波形編集用プログラムの履歴を表示する．入力部 B に連携編集用プログラムを入力することで，動作データを作成する．表示部 B では，連携編集用プログラムの履歴を表示する．連携動作エディタでは，同期と連携を色と領域で表示する．図 4.14 では，連携動作エディタに 3 つの小型 LED 制御デバイス（上から A,B,C）の動作を表示している．0〜2 秒まで同期（連携式：A = B = C），2 秒〜4 秒まで連携（連携式：A = B < C），4 秒〜6 秒まで同期（連携式：A = B = C），6 秒から 20 秒まで連携（連携式：A < B < C）することを表している．この連携動作は，“from 0 to 6 link red A = B = C”，“from 2 to 4 link blue A = B < C”，“from 6 to 20 link green A < B < C”の連携動作編集スクリプトを順に追加して作成した． スクロール機能により，複数の小型 LED 制御デバイスに格納された長時間の連携動作を表示可能とする．全書換えボタンを押すことで，PC 上で作成した連携動

表 4.4: 書換えに要する時間の比較

| 従来型（秒） | 全書換え型（秒） | 差分書換え型（秒） |
|---|---|---|
| 264 | 103 | 3 |

作の全書換えを行う．このとき，動作データには小型LED制御デバイスのIDが付加される．小型LED制御デバイスはフィルタを利用し，明滅データと該当するIDの付加された動作データを保存する．ファイル操作メニューでは，明滅波形編集用プログラムと連携編集用プログラムの履歴の保存，連携動作の保存，読み込みを可能とする．これにより，以前作成し保存した複数の連携動作を組み合わせることができる．全書換えでは明滅波形編集用スクリプトと連携編集用スクリプトを用いて明滅データと連携データを全て書換えるが，差分書換えでは，明滅波形変種用スクリプトを用いて明滅データのみを書換える．

## 4.5 評価

提案手法の有効性を示すため，デバイスの動作書換えに要する時間の比較と，実運用を行い，提案方式の使用性についての評価を行った．

**書換えに要する時間**

従来の小型LED制御デバイスを1つ1つ書換える場合，全書換え型の場合，差分書換え型の場合にかかる書換えに要する時間について比較を行う．明滅データを200バイト，動作データを42バイト，存在する小型LED制御デバイスを3個として，書換えに要する時間について比較した結果を，表4.4に示す．提案手法は，長時間の連携動作の書換えを繰り返すほど有効になる．また，提案手法は全書換え型と差分書換え型の2種類で実現されているため，ユーザのニーズに応じた使いわけが可能となる．

**使用するメモリ量の比較**

差分書換え型におけるバイトコード型プログラムのメモリ使用量を表4.5に示す．オンラインコピーは 明滅データ編集用プログラムをコピーするため，通信量が少ない．また，明滅波形編集用プログラムはバイトコード型プログラムと比較して，使用するメモリ量が少ないため，多くの履歴を保存できる．

表 4.5: バイトコード型プログラムのメモリ使用量

| 命令 | バイトコード型プログラムの容量（バイト） |
|---|---|
| from $x1$ to $x2$ darker | 10 |
| from $x1$ to $x2$ brighter | 10 |
| from $x1$ to $x2$ skip | 15 |
| from $x1$ to $x2$ shorter | 15 |
| from $x1$ to $x2$ faster | 25 |
| from $x1$ to $x2$ longer | 24 |
| from $x1$ to $x2$ slower | 43 |

**実運用事例**

**ウェディングパーティーでのデモンストレーション**

提案手法を用いた実運用の事例について紹介する．2006年7月29日と8月5日に摩耶山掬星台にて開催された，第2回星と光の祭典にて，服や物についたLEDを連携動作させた（図4.15）．このイベントでは，小型LED制御デバイスをドレス，風船，十字架，ハンカチ，手袋に取り付け，多様な連携を行った．連携動作の作成期間は6日間であった．この期間中に行った書換え回数と用いたメタプログラムの量を表4.6に示す．連続差分書換えは，メタプログラムの履歴が初期化されるまでに，連続して行った差分書換え回数の最大値を表す．この144バイトのメタプログラムは，小型LED制御デバイスで用意した200バイトの領域に十分保存することができた．全書換え型と差分書換え型を併用することで，1752バイトのメタプログラムの履歴はPC上で保存し，オンラインコピーに必要な履歴だけ小型LED制御デバイスで保存した．また，提案システムをプログラミング知識を持ったユーザに使ってもらったところ，エディタは連携動作を視覚的に把握できて直観的にわかりやすい，複雑な連携動作が表現できるようになった，連携動作作成が楽しくなったというコメントを得た．一方，描いたパターンをドラッグして編集できるとよい，スクリプトをボタンで選択できればよいというコメントを得た．このことから，エディタのユーザインタフェースは，GUI環境の改善という課題はあるが，本イベントにおいて実用上有効であったことがわかった．イベントでの実運用を通じて，提案手法は，短期間に動作書換えを繰

図 4.15: ウェディングパーティのデモンストレーションの様子

表 4.6: 実運用での書換え回数とメタプログラム量

| 書換え方式 | 回数 | メタプログラム量（バイト） |
|---|---|---|
| 全書換え型 | 70 | - |
| 差分書換え型 | 292 | 1752 |
| 連続差分書換え | 24 | 144 |

り返し行う場合に有効であることを確認した.

### ブレイクダンスパフォーマンス

2007 年 12 月 8 日と 9 日に行われたブレイクダンスパフォーマンスの明滅作成に本システムを導入した．このパフォーマンスでは，5 人のダンサーがそれぞれ 50 個のフルカラー

LEDを付け，ダンスの動きと音と明滅を融合したパフォーマンスを披露した．まず初めに，音楽プレイヤーのヘッドフォン出力から音の波形を抽出する．音の波形は，オペアンプで増幅したアナログデータをPICでサンプリングし，0から127のバイナリデータをPCに送信する．その波形をそのまま発光強度としてLEDの明滅に利用する．この波形をインクリメンタルプログラミングにより編集することで，音と同期した明滅パターンを簡単に作成することができる．明滅パターンの再生はダンサーが手動で行うため，デバイス同士を無線で同期させる手法は用いなかった．このイベントを通じて指摘された提案方式の問題点を示す．

- 実装後の連携動作のイメージがわきにくいため，始めはデフォルトの連携動作パターンを用意してほしい．
- 提案方式はデバイス同士が必ず連携するように設計されているが，連携するパターンと各々がランダムで独自に光るパターンを混在させたような緩急をつけた設計が簡単にできるようにしてほしい．
- デバイスのIDを指定して，各々の動作を編集したい．
- 連携動作を作成した後，その連携動作に対してfaster，slower，repeat，half，skipのスクリプトで編集を行えるようにしてほしい．特に，音楽に同期させて連携動作を作成するときは，明滅の波形はbrighter，darkerのスクリプトで編集し，連携動作をfaster，slower，repeat，half，skipで細かく編集する方式が有効である．
- 連携動作の作成でグラデーションが簡単に作成できるようにしてほしい．
- 初心者にでもより直観的に理解できるスクリプト表記にすべき．
- 連携パターンが長時間だと編集時の計算量が多くなり，待ち時間が増える．
- ブレイクダンスのような派手なパフォーマンスでは，多様な色を同時に表現し，デバイスごとに色を反転させるなど，より多様な連携が求められる．

このように，提案方式は比較的穏やかな明滅の連携において有効であるが，激しい明滅の連携では用意したスクリプトでは不十分であることが実運用実験を通じてわかった．激しい明滅の連携では，デバイス同士の色の関係を論理式で表す方法が有効と考えられる．例

えば，あらかじめデバイスAにある明滅パターンが実装されているとき，“B =～A”とスクリプト記述することでデバイスAの補色をデバイスBが表示したり，“B=A >> 2 sec”とスクリプト記述することで，デバイスAの明滅パターンをデバイスBが2秒遅れて再生する方式が有効である．さらに，デバイスCにある明滅パターンが実装されている場合，“B=A & C”とスクリプト記述することでデバイスAとデバイスCの明滅パターンを合成したパターンをデバイスBが再生するといった連携が簡単に実現できるような記述が考えられる．しかし，スクリプトを拡張する場合は，表記が複雑になり初心者が扱いにくくなるという問題がある．この問題については，スクリプトの処理を数学的に定義し説明することが重要であると考える．その上で，ある程度提案システムを使って慣れてもらうことが必要であると考える．

## 4.6 関連研究

AhroDは，イベント駆動型ルールを組み合わせて動作を記述する [16]．ルールを交換することで動的に動作を変更可能だが，本研究で提案するようなデバイス同士の連携モデルは考慮されていない．AhroDのための開発環境 [65] は，ルールを用いたトポロジ発見手法を用い，複数ノードの連携やノードに接続されている機器を把握することで，実環境でのアプリケーション開発を支援するが，ノードの連携動作や迅速な動作変更は考慮されていない．

Smart-Itsは様々なものに埋め込むための小型コンピュータである [3]．Smart-Itsにおいても，本研究で提案するような連携動作を迅速に書換える方式は実装されていない．

MOTEは無線センサネットワークのためのプラットフォームである [49]．MOTEでは，ネットワークトポロジを自動的に発見でき，センサ情報の収集が可能である．nesCはセンサネットワークを構築するためのプログラミング言語で，Tiny OS上で動作する [14]．文献 [28] では，MOTE上で，無線センサの動作を迅速に再プログラムする方式が研究されている．この方式は以前のプログラムイメージと新しいプログラムイメージをハッシュ関数を用いて比較を行うため，以前のプログラムイメージと新しいプログラムイメージをノードが保持しておく必要がある．一方，本研究で提案する方式は更新した回数の比較のみを行うため更新処理が簡単であり，以前のプログラムイメージと新しいプログラムイメージの両方を保持する必要がない．

## 4.7 むすび

本章では，第3章で述べたインクリメンタルプログラミングを拡張し，複数の小型LED制御デバイスの明滅連携作成方式を提案した．提案する手法ではLEDを連携させる連携モデルを構築し，状況に応じて小型LED制御デバイスの全書換えと差分書換えを行うことで迅速な動作変更を可能とする．これにより，ユーザは連携動作の実装・評価・編集を繰り返すことが容易になり，設計者の負荷を軽減することができる．本システムを用いた実運用経験を通じて，提案方式の有効な点と改良すべき点を検討した．

# 第5章

# 結論

## 5.1 本論文のまとめ

本論文では，ユビキタスコンピューティング環境における電飾の創作活動を感性と工学の観点から支援するために，明滅光源のファッションとしての可能性と明滅設計者の負荷を軽減する明滅設計方式について議論した．

まず，第1章では，ユビキタスコンピューティング環境における電飾の明滅表現の重要性について述べた．より豊かな明滅表現を実現するために，ファッションとしての明滅の有効性が不明確である点と明滅設計者の負荷が大きい点が問題になることを明らかにし，本研究の位置付けを明らかにした．

第2章では，電飾をファッションに利用した場合の有効性を調べるために，衣服と明滅を組み合わせた感性評価実験を行い，その関係について考察した．これまでの衣服と明滅それぞれの感性評価に関する研究は，一般的に認知されている対象物に対して行われている．衣服と明滅を組み合わせたファッションは新しい評価対象物であり，評価手法は確立されていない．そこで，先行研究を参考にしながら評価対象物を限定して実験を行った．実験の結果，3つの因子が抽出され，先行研究との比較により第1因子をフォーマル性，第2因子を装飾性，第3因子をくつろぎとした．衣服と明滅の関係に着目したところ，赤または青のゆらぎの波形と衣服の変化には，フォーマル性とくつろぎの因子得点を変化させる相乗効果の傾向が見られることを示した．

第3章では，明滅設計者の負荷を軽減する明滅制御システムを提案した．明滅設計に特化したプログラミング方式としてインクリメンタルプログラミングを提案し，一度作成し

た明滅パターンを細かく編集することが容易になった．より長時間の明滅パターンを低速かつメモリ容量の限られているデバイスに実装するために，5つの圧縮方式を実装し有効な方式を検討した．また，非技術者を含む様々な分野の人間がインクリメンタルプログラミングと明滅の圧縮方式を利用できるように開発環境の構築を行った．これにより，様々な分野の人間に対して明滅設計の試行錯誤が容易になり，より豊かな明滅表現が実現しやすくなった．

第4章では，インクリメンタルプログラミングを用いた明滅連携作成方式を提案した．様々な物や場所についたLEDを連携させる連携モデルを構築し，インクリメンタルプログラミングを拡張した．インクリメンタルプログラミングの明滅設計は，編集の反復作業と全体的な構成構築作業に分割されることから，PC上のインクリメンタルプログラミングとデバイス上の差分更新を組み合わせ，全書換え型と差分書換え型の2種類の書換え方式を提案した．また，差分更新を繰り返した場合にデバイス全体の整合性を保つために，デバイス間でプログラムを自動的にコピーする手法を提案した．これにより，明滅の連携動作作成時における設計作業の負荷を軽減することができた．

## 5.2 検討課題

本研究では，ユビキタス環境における電飾の創作活動を感性と工学の観点から支援することを目的として研究を行った．しかし，いずれも基礎的な研究にとどまっており，検討すべき課題が多数ある．本節ではそれらについて述べる．

### 第2.3節の実験における評価項目の追加

本研究では，評価項目を衣服3種類，明滅の色3種類，明滅パターン6種類，明滅させる部位を左胸に限定して感性評価実験を行った．さらに，光の色を変化させた場合の評価，明滅させる部位を変えた場合の評価，明滅の数を増やした場合の評価，衣服の色を変化させた場合の評価，明滅を同期させた場合の評価が必要であると考えられる．LEDは指向性が強く，色を変化させた場合の応答速度が速いことから，色を激しく変化させる利用が考えられる．明滅の色を一定間隔ごとに赤，緑，青と変化させた場合の印象の変化，および変化させるタイミングを速くした場合または遅くした場合の印象の変化を調べる必要がある．衣服におけるワンポイントの位置として左胸が考えられるが，ウェアラブルコンピュータの形態は腰にモバイルPCを装着することが考えられる．腰に装着したPCの電源ラン

プを衣服のデザインとして用いた場合の印象の変化を調べる必要がある．既存の商品として光るブレスレットやイヤリングが販売されているが，手首や耳を光らせた場合など体の様々な部位を明滅させた場合の印象の変化を体系的に把握することが必要である．

光源の視認性に着目した場合，光源の数を増やした場合の印象の変化を把握することで，明滅を衣服のデザインとして利用するだけでなく，夜間の工事現場での衣服や子供や高齢者を交通事故から守る衣服などへの応用が考えられる．今回の実験では，衣服のシルエットを提示して実験を行ったため，衣服の黒と明滅の色とのコントラストを評価したことになる．衣服の色を変えて評価実験を行うことで，衣服と明滅の関係をより明らかにできる．さらに，複数人で明滅を同期させたときの印象の変化や音楽と同期させて明滅させた印象を調べることで，電飾パフォーマンスでの効果的な演出について知見が得られる．

より心理学的な観点からの検討課題として，背景の影響，被験者による印象の違いを調べることが必要であると考えられる．場における衣服の印象に関する研究[71]によると，衣服の印象は空間から影響を受けることがわかっている．例えば，謝恩会などのフォーマルな場所では，カジュアルな衣服に対して違和感を覚える．特に多数の人間がいる場所で一人だけ異質な服装の人がいる場合，その服装に対する印象は変化する．様々なシチュエーションにおいて明滅させた衣服を感性評価することで，電飾ファッションの活用に適した場面を考察することができると考えられる．被験者の数を増やし，年齢や性別ごとに評価結果を考察することで，世代により電飾ファッションの受け入れやすさを考察することができる．さらに，心理学分野での研究者と工学分野での研究者に対して感性評価を行うことで，心理学と工学における電飾ファッションの考え方の違いを明らかにできると考えられる．

#### 評価結果を利用した明滅作成支援システム

電飾ファッションに対する印象を蓄積しデータベース化することで，電飾ファッションの明滅を自動で作成するシステムを提案することができる．例えば，ある電飾ファッションに対し，強調したい印象を選択することで明滅パターンを自動で作成するシステムがあれば，明滅設計者の負荷を軽減できる．

#### 感情表現としての電飾ファッション

人の感情に合わせて明滅を変化させることで，感情をファッションとして表現すること

表 5.1: インクリメンタルプログラムの拡張

| スクリプト | 処理 |
|---|---|
| brightness * $a$ from $t_1$ to $t_2$ | $t_1$ 秒から $t_2$ 秒までの明滅パターンの発光強度を $a$ 倍する. |
| tempo * $a$ from $t_1$ to $t_2$ | $t_1$ 秒から $t_2$ 秒までの明滅パターンの速度を $a$ 倍する. |
| $*$ bright $a$ to $b$ from $t_1$ to $t_2$ | 以前作成したパターンを $f(x)$, 新たに追加するパターンを $g(x)$ とした場合, $f(x) * g(x)$ によるコンボリューションを行う. |
| +bright $a$ to $b$ from $t_1$ to $t_2$ | 以前作成したパターンを $f(x)$, 新たに追加するパターンを $g(x)$ とした場合, $f(x) + g(x)$ を行う. |

ができる. 例えば, 心拍数や血圧などをセンシングして明滅の色や速度を制御することで, 興奮した状態や緊張状態を視覚的に捉えることが可能となる. 効果的なシチュエーションとしては, 演劇などの舞台が考えられ, 演者の感情をより強調する演出効果が期待できる.

### インクリメンタルプログラミングの拡張

本研究で提案したインクリメンタルプログラミングは, 明滅の発光強度をさらに細かく編集することを想定していない. また, 明滅のタイミングをさらに細かく編集することや, 明滅パターン同士を合成した新たなパターンの生成については考慮していない. これらは, インクリメンタルプログラミングをより細かい編集や新たな生成方式が可能になるように拡張することで実現できると考えられる. 表 5.1 にインクリメンタルプログラミングを拡張した一例を示す. 図 5.1 にコンボリューションの例を示す. ここでは, あらかじめ図 5.1 (上) の実践で描かれた明滅パターンが作成されているとする. ここで, "* bright 0 to 3 from 0 to 3.5"のスクリプトを追加することで, 図 5.1 (下) の明滅パターンのように, 最初は明滅の変化が少ないが, 後半になる程, 明滅の変化が激しくなるパターンを作成することができる. また, 追加するプログラムが増えるとコードが冗長になり, プログラムの編集の様子をユーザが直感的に把握することが困難になってくる. その場合, プログラムの最適化を行うことが有効と考えられる.

新しいスクリプトを追加したりプログラムの最適化を行うためには, インクリメンタルプログラミングの基礎理論を構築することが重要となる. プログラムを逐次追加していく本方式では, プログラムのセマンティクスを保持するために, その枠組みを数学的に定義

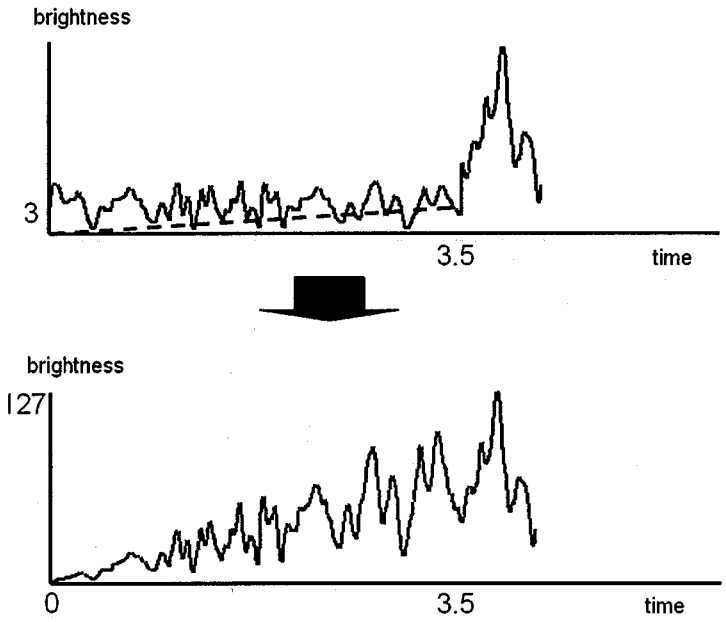


図 5.1: 明滅パターンのコンボリューション

する必要がある．光の制御を表現するには，明滅パターンを時系列で把握する方法が適しているので，インタバルロジックに基づいたプログラム変換が有効と考えられる．特に区間時制に基づいた論理式の展開やたたみ込み技術が有効である．

### メタプログラムの拡張

本研究では，インクリメンタルプログラミングの一部のスクリプトをメタプログラムとして，小型LED制御デバイス上で明滅パターンを編集するプログラムを展開した．このメタプログラムを拡張することで，より複雑なデバイス群の表現が可能になる．例えば，図5.2のようにデバイスが配置されているとする．円は無線の有効範囲を表している．ここでユーザが "from 0 to 1 slower" とPCに入力したとする．PCからコマンドを送信することでデバイスAはメタプログラム "from 0 to 1 slower" から明滅を編集するプログラムを生成し，明滅を編集する．その後，デバイスAはメタプログラム "from 0 to 1 slower × 2" をデバイスBに送信する．同様にデバイスBからメタプログラム "from 0 to 1 slower × 3" をデバイスCへ送信し，同様にデバイスCからメタプログラム "from 0 to 1 slower × 4" をデバイスDへ送信する．ここでデバイスA，B，C，Dにはあらかじめ図5.3の編集前の明滅パターンが実装されているとする．メタプログラムをデバイス間で送受信することで，編

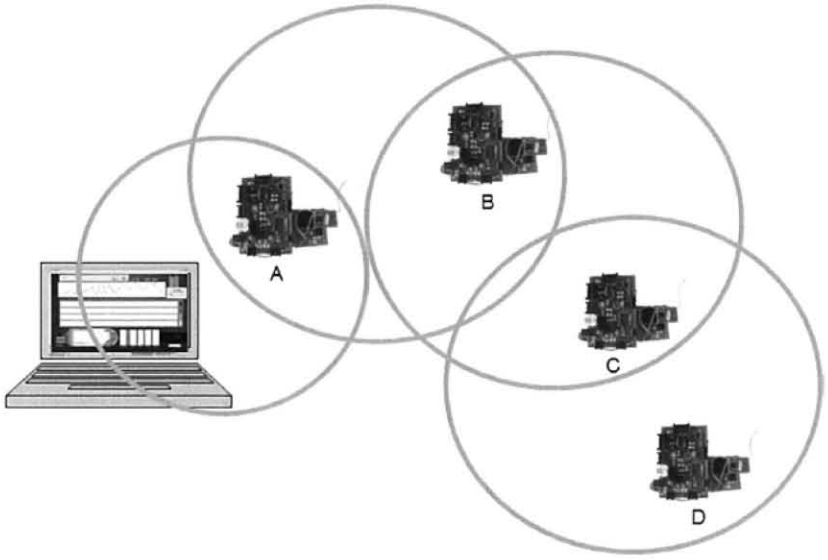


図 5.2: メタプログラムをデバイス間で送信していく様子

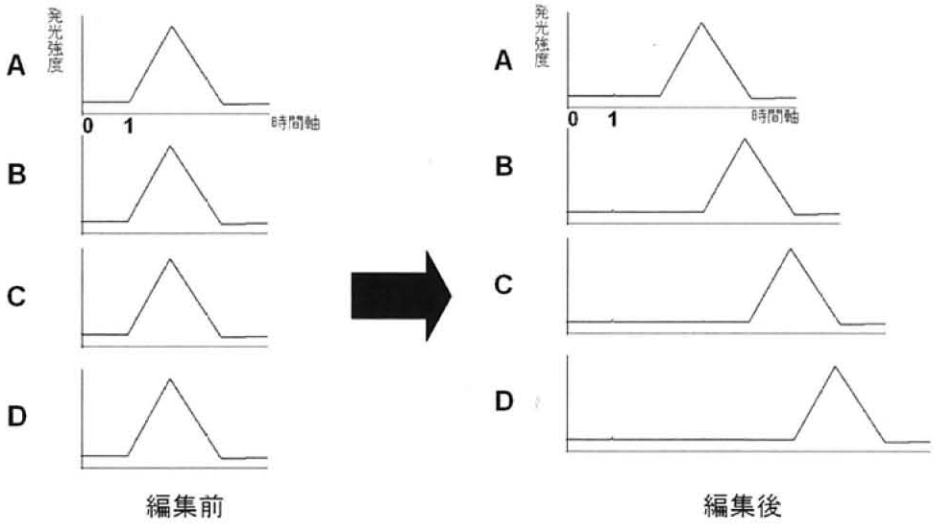


図 5.3: メタプログラムによる明滅パターンの編集

集後のようにデバイス間で明滅するタイミングをシフトさせた明滅パターンを作成できる.

**イルミネーション以外での応用**

本研究で提案した明滅制御システムおよび明滅連携方式は，大量のイルミネーションを

制御しアート表現を支援することを目的として行っている．各々のLEDを制御するデバイスが低速でメモリ容量が少ない場合，小さなマイコンの限られたメモリ空間を活用する方策としてインクリメンタルプログラミングは有意義と考える．このインクリメンタルプログラミングは単にLED制御のための技術でなく，将来的にはユビキタス環境下での，随所に点在するデバイスの同期制御に応用できる有用な技術であると考える．例えば，室内に配置されたユビキタスデバイスのセンサ制御，モータ制御，スピーカ制御などの群コンピューティングが考えられる．

# 謝辞

本研究全般に関して，懇切なる御指導と惜しみない御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾章治郎教授に謹んで御礼申し上げます.

本研究を推進するにあたり，直接の御指導，御助言，御討論を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本昌彦教授，ならびに，夙川学院短期大学家政学科 内田直子准教授に衷心より感謝申し上げます.

本論文をまとめるにあたり，貴重な時間を割いて頂き，大変有益な御助言を多数賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 岸野文郎教授，大阪大学サイバーメディアセンター 下條真司教授，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 藤原融教授，薦田憲久教授，原隆浩准教授に心より感謝申し上げます.

本研究において，多大なる御助言，御協力，御支援を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 寺田努准教授，大阪大学サイバーメディアセンター 秋山豊和講師，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 神崎映光助教，京都大学学術情報メディアセンター 義久智樹助教，神戸大学自然科学系先端融合研究環 竹川佳成助教に深謝致します.

本研究において，ともに研究を進め，多大なる御協力を頂いた神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 佐野渉二氏，山本哲也氏，藤田直生氏に深く御礼申し上げます.

本研究を進める上で惜しみない御助言，御協力，研究活動を進めるにあたっての多大なる御支援を頂いた，国際電気電信基礎技術研究所 知識科学研究所 宮前雅一博士，日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎技術研究所 岸野泰恵博士，えぬぷらす 中田眞城子氏，神戸ベンチャー研究会の諸氏に感謝の意を表します.

本研究を進めるにあたり，多くの御討論や御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾研究室，ならびに，神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本研究室の諸氏に心より感謝申し上げます.

最後に，研究生活を送るうえで，暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親を始めとする家族に心からの感謝と御礼を申し上げます.

# 参考文献


[1] G. D. Abowd, C. G. Atkeson, A. FR. Bobick, I. A. Essa, B. Macintyre, E. D. Mynatt, and T. E. Starner: Living Laboratories: The Future Computing Environments Group at the Georgia Institute of Technology, In *Proceedings of the 2000 Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2000)*, pp. 215–216 (2005).

[2] BANDAI: ROBOT WORKS, http://www.roboken.channel.or.jp/borg/.

[3] M. Beigl and H. Gellersen: Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects, *Smart Objects Conference (sOc)*, (2003).

[4] J. Berzowska: Memory Rich Clothing: Second Skins That Communication Physical Memory. In *Proceedings of the 5th Conference on Creativity & Congnition(C& C'05)*, pp. 32-40 (2005).

[5] J. Berzowska: Electronic Textiles: Wearable Computers, Reactive Fashion, and Soft Computation, *Textile*, Vol. 3, No. 1, pp. 2–19 (2005).

[6] B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern, and S. Shafer: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, in *Proceedings of Handheld and Ubiquitous Computing: Second International Symposium (HUC 2000)*, (2000).

[7] L. Buechley: A Construction Kit for Electronic Textile, In *Proceedings of IEEE International Symposiumon Wearable Computers (ISWC 2006)*, pp. 83–90 (2006).

[8] Crickets: http://llk.media.mit.edu/projects.php?id=1942.

[9] 大和総研　新規産業レポート 2007 冬季号: 飛躍する LED 産業, http://www.dir.co.jp/research/report/hitech/06120101hitech.html.

[10] M. Dekoli and B. Mikhak: CODACHROME: A System for Creating Interactive Electronic Jewelry for Children, In *Proceeding of the 2004 Conference on Interaction Design and Children (IDC04)*, pp. 139–140 (2004).

[11] 藤原康晴: 女子大生の好きな被服のイメージと自己概念との関連性, 日本家政学会誌, Vol. 38, No. 7, pp. 593–598 (1987).

[12] 福田忠彦: 生体情報システム論, 産業図書 (1995).

[13] 福本麻子, 蔡東生, 安村通晃: 印象派絵画の統計的解析, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 89–97 (2005).

[14] D. Gay, P. Levis, R. V. Behren. M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler: The nesC language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems, In *Proceeding of ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, pp. 289–300 (2003).

[15] 橋本令子, 加藤雪枝: 個性による着装イメージの表現, 日本家政学会誌, Vol. 45, No. 7, pp. 639–648 (1994).

[16] 早川敬介, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 柏谷篤, 坂根裕, 西尾章治郎: ユビキタスコンピューティングのためのルールに基づく入出力制御デバイス, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 341–354 (2003).

[17] 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ユビキタス環境における LED 明滅プログラミング方式, 電子情報通信学会和文論文誌 D, Vol. J90-D, No. 6, pp. 1367-1374 (2007).

[18] 細見心一, 内田直子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションのための明滅型光源の感性評価, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 297–304 (2007).

[19] 細見心一, 山本真史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションにおける LED 明滅パターン作成・再生のための制御システム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 335-342 (2007).

[20] S. Hosomi, M. Tsukamoto, and S. Nishio: Cooperation of LED Control Chips in Ubiquitous Environment, In *Proceeding of IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2007)*, pp. 249–254 (2007).

[21] S. Hosomi, M. Tsukamoto, and S. Nishio: A System for Controlling LED Blink in Wearable Fashion, In *Proceeding of International Wireless Communication and Mobile Computring Conference (IWCMC 2007)*, pp. 665–670 (2007).

[22] 細見心一, 内田直子, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 衣服とLEDの感性評価に関する研究に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 2, pp. 1-6 (2005).

[23] 細見心一, 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルファッションのための1/fゆらぎの感性評価実験に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 3, pp. 7-14 (2005).

[24] 細見心一, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ユビキタス環境におけるLED明滅の連携動作記述方式, 情報処理学会研究報告 (モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 2006-MBL-39), pp. 103-110 (2006).

[25] 稲垣照美, 犬塚浩二, 安久正紘, 赤羽秀郎, 阿部宣男: ホタルの発光パターンにおける $1/f^n$ ゆらぎ現象と癒し効果, 日本機械学会論文集, Vol. 67, No. 657, pp. 1583–1590 (2001).

[26] 石塚純子, 加藤雪枝, 椙山藤子: 各種デザインにおける着装イメージ, 日本家政学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 321–332 (1987).

[27] Japan.internet.com コラム: http://japan.internet.com/column/allnet/20070309/26.html.

[28] J. Jeong and D. Culler: Incremental Network Programming for Wireless Sensors, In *Proceeding of First Annual IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, (SECON2004)*, pp. 25–33 (2004).

[29] 板生知子, 塚本昌彦, 大江瑞子: ウェアラブルコンピューティングとファッションの融合に向けた取り組み, 情報処理学会研究会報告, Vol. 2004, No. 44, pp. 59–64 (2004).

[30] 伊藤久美子: 服装における色彩調和論に関する研究-色彩感情からみた配色-, 日本色彩学会, Vol. 25, No. 3, pp. 183–192 (2001).

[31] 伊藤久美子: 同一色相内の二色配色の感情効果, 日本色彩学会, Vol. 28, No. 1, pp. 3–15 (2004).

[32] 岩下豊彦: SD 法によるイメージの測定　その理解と手引き, 川島書店 (1996).

[33] M. I. Berry and Y. Kim: Hearwear: The Fashion of Environmental Noise Display, In *Proceedings of the ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH2004)*, (2004).

[34] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister: Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust", In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 271–278 (1999).

[35] 加藤雪枝, 椙山藤子: 被服における配色効果の研究 (第 1 報)　ブラウスとスカートの配色の感情効果, 日本家政学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 29–35 (1980).

[36] 川本勝: 流行の社会心理, 勁草書店, pp. 38–53 (1981).

[37] KDDI au:エンタテイメント: http://au.kddi.com/ezweb/service/entertainment.html.

[38] 有限会社 ケイツー電子工業: http://www.k2-denshi.com/.

[39] 岸野泰恵, 塚本昌彦 義久智樹, 西尾章治郎: ファッション・コミュニケーションのための led を用いた装着型デバイス, 情報処理学会第 65 回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 191–194 (2003).

[40] 岸野泰恵, 塚本昌彦, 坂根裕, 西尾章治郎: ウェアラブル環境のための LED を用いたビジュアルマーカ, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG(TOD 19), pp. 86–97 (2003).

[41] Y. Kishino, T. Terada, M. Tsukamoto, T. Yoshihisa, K. Hayakawa, A. Kashitani, and S. Nishio: A Rule-Based Discovery Mechanism of Network Topology among Ubiquitous Chips, in *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Services 2005 (ICPS'05)*, pp. 198–207 (2005).

[42] Y. Kishino, H. Fujiwara, T. Tanaka, A. Shimosuka, T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, T. Itao, M. Oe, and S. Nishio: Bloom Accessory: Accessories Using LEDs with Remote Control, In *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2004)*, pp. 180–181 (2004).

[43] LEDベルトバックル: http://www.be-s.co.jp/Products/GA/led-buckle.html.

[44] LEGO: MINDSROEMS: http://mindstorms.lego.com/japan/products/.

[45] Logo Foundation: http://el.media.mit.edu/logo-foundation/.

[46] R. L. Ashok and D. P. Agrawal: Next-Generation Wearable Networks, *IEEE Transaction Computer*, Vol. 36, No. 11, pp. 31–39 (2003).

[47] D. J. Malan and H. H. Leitner: Scratch for Budding Computer Scientists, In*Proceedings of Technical Symposium on Compouter Science Education*, Vol. 39, pp. 223–227 (2007).

[48] MIT Media Laboratory: http://www.media.mit.edu/.

[49] MICA: http://www.xbow.com/products/Wireless_Sensor_NetWorks.htm.

[50] Microchip Technoloby Inc: MPLAB http://www.microchip.com/1010/index.htm.

[51] 牧成一, 藤本実, 花岡邦俊, 沖野将司, 池田朋大, 岡田量太, 細見心一, 中田眞城子, 塚本昌彦: 神戸イルミネプロジェクト：LEDを使ったブレイクダンスパフォーマンス, マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム, Vol. 2007, No. 1, pp. 1207-1214 (2007).

[52] 増井俊之: インタフェースの街角, アスキー出版, pp. 74–75 (2005).

[53] 松下伸行, 日原大輔, 後輝行, 吉村真一, 暦本純一: ID Cam：シーンとIDを同時に取得可能なイメージセンサ，情報処理学会シンポジウムシリーズ (インタラクション2002), Vol. 2002, No. 7, pp. 6–13 (2002).

[54] 松下電工株式会社: RGBPRO, http://biz.national.jp/Ebox/everleds/products/production/rgbpro/flood/index.html.

[55] 松田隆夫: 視知覚, 倍風館 (1995).

[56] 武者利光: ゆらぎの発想-1/f ゆらぎの謎にせまる, NHK 出版 (1998).

[57] N. Kohtake, R. Ohsawa, T. Yonezawa, M. Iwai, K. Takashio, and H. Tokuda, : Self-Organizable Panel for Assembling DIY Ubiquitous Computing, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 10, No. 6, pp. 345–355 (2006).

[58] G. Nanda, A. Cable, V. Michael B., M. Ho, and H. Hoang: bYOB [Build Your Own Bag]: A Computationally-Enhanced Modular Textile System, In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile and ubiquitous multimedia (MUM'04)*, pp. 1–4 (2004).

[59] NEDO (新エネルギー・産業技術統合開発機構): ナノテクノロジー・材料技術分野, http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/nan.

[60] NTT DOCOMO: エンタテイメント・コンテンツ, http://www.nttdocomo.co.jp/imode/content.

[61] 小野定康: ユビキタス技術　動画像の高能率符号化－ MPEG-4 と H.264 －, オーム社 (2005).

[62] 大森正子, 橋本令子, 加藤雪枝: 色彩刺激に対する心理評価と生理反応評価, 日本色彩学会誌, Vol. 26, No. 2, pp. 50–63 (2002).

[63] PIC C コンパイラのホームページ, http://www.ccsinfo.com/picc.html.

[64] 佐川賢: 色彩パターンの心理評価－占有面積率・配色数・分布の効果, 日本色彩学会, Vol. 19, No. 1, pp. 19–29 (1995).

[65] 相良亮平, 義久智樹, 岸野泰恵, 寺田努, 塚本昌彦, 裕成光樹, 田口大悟, 西尾章治郎: イベント駆動型小型デバイス Ahrod のためのアプリケーション開発環境, 電子情報通信学会 2005 年総合大会, p. 362 (2005).

[66] 高木修: 被服行動の社会心理学, 北大路書房 (2002).

[67] E. Sylvan: Integrating Aesthetic, Engineering, and Scientific Understanding in a Hands-on Design Activity, In *Proceedings of International Conference for Interaction Design and Children (IDC 2005)*, poster (2005).

[68] 高松衛, 長山信一, 中嶋芳雄: 夜間都市照明に関する心象評価の基礎的研究, 日本色彩学会誌, Vol. 26, No. 1, pp. 11–17 (2002).

[69] 特定非営利活動法人 LED 照明推進協議会: http://www.led.or.jp.

[70] 塚本昌彦, 松坂敬太郎: 「飛ぶコンピュータ」の実現に向けて, 情報処理学会研究報告 (モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 2006-MBL-39), Vol. 2006, No. 120, pp. 111–118 (2006).

[71] 内田直子, 小林茂雄, 長倉康彦: 外空間と内空間における女性服装の適合度, 日本官能評価学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 29-37 (1998).

[72] A. Wakita, M. Tanji, S. Katada, M. Shibutani, H. Uchiyama, and M. Inakage: A Coordination Model for Wearable Fashion, In*Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC2005)*, pp. 216-217 (2005).

[73] 渡辺澄子, 川本栄子, 中川早苗: 服装におけるイメージとデザインとの関連について (第一報), 日本家政学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 459–466 (1991).

[74] M. Weiser: The Computer for the Twenty-first Century, *Scientific American*, Vol. 265, No. 3, pp. 94–104 (1991).

[75] 山本博資: ユニバーサルデータ圧縮アルゴリズムの変換ー基礎から最新手法までー, 情報論的学習理論ワークショップ, pp. 339–348 (2001).

[76] 吉岡徹: 被服における図柄のイメージ（第一報）縞柄と色彩におけるイメージの計量, 日本家政学会誌, Vol. 36, No. 10, pp. 793–802 (1985).

[77] ゆらぎ現象研究会: ゆらぎの科学, Vol. 1–9, 森北出版 (1991).