

修士論文

カラーQRコードの実装とその応用に 関する研究

A study on implementation and application of color QR codes

池田 新

立命館大学大学院
理工学研究科電子システム専攻

2026年3月

内容梗概

近年，技術的，権利的，及び社会的背景を受けて，QRコード（Quick Response code）は我々の生活に広く浸透している。QRコードは，二次元コードの一種であり，従来のバーコードと比較して記録可能な情報量が多く，誤り訂正能力に優れ，かつ高速な読み取りが可能であるという技術的優位性を有している。更に，自動車部品のトレーサビリティ管理を目的として開発されながらも，特許権を使用しないことが宣言されたことにより，特許フリーで利用可能な技術として世界中に普及した。加えて，スマートフォンのような高性能，かつ多機能なデバイスの普及に伴い，広告媒体や決済手法としても利用が拡大している。

しかしながら，現行のQRコードは単一色の濃淡のみで情報を表現しており，色情報を用いた更なる情報量拡張の余地が残されている。

そこで本研究では，RGB各色を利用したカラーQRコードシステムの実装を行い，その有用性について検討した。本研究で扱うカラーQRコードは，RGBそれぞれの単色QRコード画像を重ね合わせることで生成されるものであり，赤・緑・青に加え，シアン，マゼンタ，イエロー，白，黒の計8色で構成されるカラー画像となっている。

具体的には，カラーQRコードの読み取りアプリケーションをFlask及びOpenCVを用いて実装し，撮影画像に対する前処理，色抽出，モルフォロジー処理，及びQR検出処理を組合せた読み取りシステムを構築した。更に，従来のモノクロQRコードとの比較実験を通して，撮影距離と検出率の関係を評価した。その結果，モノクロQRコードと比較して検出可能距離は短くなるものの，カラーQRコードは理論上3倍の情報量を保持可能であることから，検出可能距離×QRコードの情報量という新たな評価指標を導入することで，カラーQRコードの有効性を定量的に示した。

また本研究では，近年発展が著しい画像生成AIに着目し，カラーQRコードを入力画像として，QRコードとしての可読性を維持したままイラスト化する手法についても検討を行った。Stable Diffusion及びControlNetを用いた画像生成環境を構築し，生成画像に対する検出可否の評価を行うことで，カラーQRコードと画像生成AIの融合可能性について考察した。

本研究の結果として，撮影距離約60cmの近距離において安定した読み取りが可能なカラーQRコード検出アプリケーションを実現するとともに，カラーQRコードの情報拡張性及び画像生成AIとの組合せによる新たな応用可能性を示した。

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 QR コードについて	3
1.3 本研究の目的	6
第2章 カラー QR コードに関する先行研究	7
2.1 ステゴパネル	7
2.2 三重大学 寺田らによる研究	10
2.3 Henryk Blasinski らによる研究	12
2.4 Nutchanad Taveerad らによる研究	14
第3章 カラー QR コードエンコード/デコードシステムの開発	17
3.1 研究目的	17
3.2 エンコード方法	18
3.3 色空間について	20
3.4 デコード方法	21
3.5 読み取りアプリの開発	26
第4章 検出性能の比較実験	29
4.1 評価実験 1	29
4.2 実験結果 1	34
4.3 考察 1	35
4.4 評価実験 2	37
4.5 実験結果 2	42
4.6 考察 2	43
第5章 カラー QR コードを用いた AI イラストの生成	45
5.1 イラストに見える QR コード	45
5.2 カラー QR コード入力によるアート QR コード生成の利点	49
5.3 イラスト生成 AI の原理	50
5.3.1 GAN	51
5.3.2 潜在拡散モデル	51
5.4 使用したソフトとモデル	52

5.4.1	VAE (variational auto encoder)	54
5.4.2	チェックポイント (ckpt)	54
5.4.3	controlnet	54
5.4.4	K サンプラー	54
5.4.5	LoRA	54
5.5	実験内容	55
5.6	実験結果	55
5.6.1	各 controlnet による出力画像への影響	55
5.6.2	3 種類の controlnet を使用した画像生成	58
5.7	考察	59
第 6 章	結論	61
6.1	まとめ	61
6.2	今後の展望	61
6.2.1	カラー QR コードの読み取りシステムについて	61
6.2.2	カラー QR コード入力によるアート QR コードの生成について	62
参考文献		63
謝辞		73
発表論文リスト		75

図 目 次

1.1	QR コード決済サービスの普及率(各国比較)	2
1.2	電子機器の普及率の推移	3
1.3	QR コードの構造	4
1.4	QR コードのバージョン	5
1.5	ファインダーパターンの原理	6
2.1	肉眼で観測したステゴパネル	7
2.2	カメラで観測したステゴパネル	8
2.3	フリッカーノイズが入ったカメラ画像	8
2.4	ステゴパネルの点滅周波数と文字表現の仕組み	9
2.5	ステゴパネル V の RGB マイクロ QR 層	9
2.6	RGB マイクロ QR 層によるマイクロ QR コード表示	10
2.7	カラーサンプル画像の元データ	11
2.8	学習用カラー QR コードの元データ(パターン A)	11
2.9	学習用カラー QR コードの元データ(パターン B)	11
2.10	使用色 8 色のカラー QR コード	12
2.11	使用色 64 色のカラー QR コード	12
2.12	Blasinski による色干渉除去アルゴリズムの開発	13
2.13	カラー QR コードの検出結果	15
3.1	加法混色	19
3.2	カラー QR コードのエンコード方法	19
3.3	RGB 色空間における色の表現例	20
3.4	HSV 色空間での色の表現方法	21
3.5	カラー QR コードのデコード方法	22
3.6	デコード時のフローチャート	23
3.7	膨張処理のイメージ	24
3.8	収縮処理のイメージ	24
3.9	赤色に対する色の抽出処理	25
3.10	読み取りアプリの web 画面表示	27
3.11	QR コード不検出時の web 画面表示	28

4.1 実験に使用したカラー QR コード画像	30
4.2 実験時の画像撮影環境	31
4.3 距離 20 cm から撮影したときの画像	31
4.4 距離 40 cm から撮影したときの画像	32
4.5 距離 60 cm から撮影したときの画像	32
4.6 距離 80 cm から撮影したときの画像	33
4.7 距離 100 cm から撮影したときの画像	33
4.8 比較対象とするモノクロ QR コードの画像	34
4.9 膨張処理前の画像	36
4.10 膨張処理後の画像	36
4.11 文字列分割と QR コードの低解像度化	38
4.12 低解像度化処理前 QR コードの仕様	38
4.13 低解像度化処理後 QR コードの仕様 1	39
4.14 低解像度化処理後 QR コードの仕様 2	39
4.15 低解像度化処理後 QR コードの仕様 3	40
4.16 低解像度化処理前後の比較	40
4.17 モノクロ QR コードの撮影データ	41
4.18 カラー QR コードの撮影データ	42
5.1 生成 AI の市場規模予測	45
5.2 アート QR コードの例 1	46
5.3 アート QR コードの例 2	47
5.4 アート QR コード生成の流れ	48
5.5 QRr コードの調整に使用した QR コード生成サイト	48
5.6 アート QR コード生成手法 A	49
5.7 アート QR コード生成手法 B	50
5.8 カラーアート QR コードの仕様の例	50
5.9 GAN による生成のイメージ	51
5.10 GAN による生成のイメージ	52
5.11 comfyUI の操作画面	53
5.12 画像生成に使用した入力画像	56
5.13 brightness の強度による比較	56
5.14 qrcode_monster_v1 の強度による比較	57
5.15 qrcode_monster_v2 の強度による比較	57
5.16 T2Iadapter_color の強度による比較	57
5.17 3 種類の controlnet を使用した生成結果 (1)	58
5.17 3 種類の controlnet を使用した生成結果 (2)	59
6.1 カラー QR コードの検出率を向上させる改善案	62

表 目 次

3.1 歴代 iPhone 機種に搭載されたカメラの画素数比較	17
4.1 カラー QR コードサンプルに使用した文字列	30
4.2 色抽出処理のみを行った際の検出率の比較 [%]	34
4.3 膨張処理時にカーネルサイズ 5×5 を適用した際の検出率 [%]	34
4.4 膨張処理時にカーネルサイズ 4×4 を適用した際の検出率 [%]	35
4.5 膨張処理時にカーネルサイズ 3×3 を適用した際の検出率 [%]	35
4.6 膨張処理時にカーネルサイズ 2×2 を適用した際の検出率 [%]	35
4.7 低解像度化処理前後での検出可否	42
4.8 低解像度化処理前後でのクロージング処理適用後の検出可否	43
5.1 使用したプロンプト	49

第1章 序論

1.1 研究背景

近年, 高速, かつ安定した読み取りが可能な2次元コードであるQRコード(Quick Response code)が世界的に使用されている。この技術が普及した理由として, 大きく分けて三つの背景がある。それは, 技術的, 権利的, そして社会的背景である。

始めに, 技術的背景について述べる。これはQRコードが持つ技術的な優位性に由来するものであり, 従来使用されてきた1次元バーコードと比較して, QRコードは2次元で構成されており, 記録可能な情報量が多く, 誤り訂正能力が強い, かつ高速で安定した読み取りが可能等, 利点が複数存在している。

次に, 権利的な背景について述べる。QRコードは1994年に特許出願[1]がなされたにもかかわらず, 誰でも自由に使用可能である。QRコードは自動車部品のトレーサビリティ管理のためにデンソーの一事業部(現デンソーウェーブ)によって開発された[2]。しかしながら, デンソーはその仕様をオープンにし, 特許の自由な使用を許可した。これにより, QRコード決済や, 航空券等のチケット管理など, 本来開発者が想定していなかったような用途でも使われ, 社会に広く浸透していった。ここで, QRコードの普及率を示す例として, 世界各国におけるQRコード決済サービスの普及率を示す(図1.1)。総務省の2021年の調査によると, 日本におけるQRコード決済サービスの普及率は既に5割を超えており, 更には, 日本よりQRコード決済が普及している中国では, その普及率が66%にまで達している。

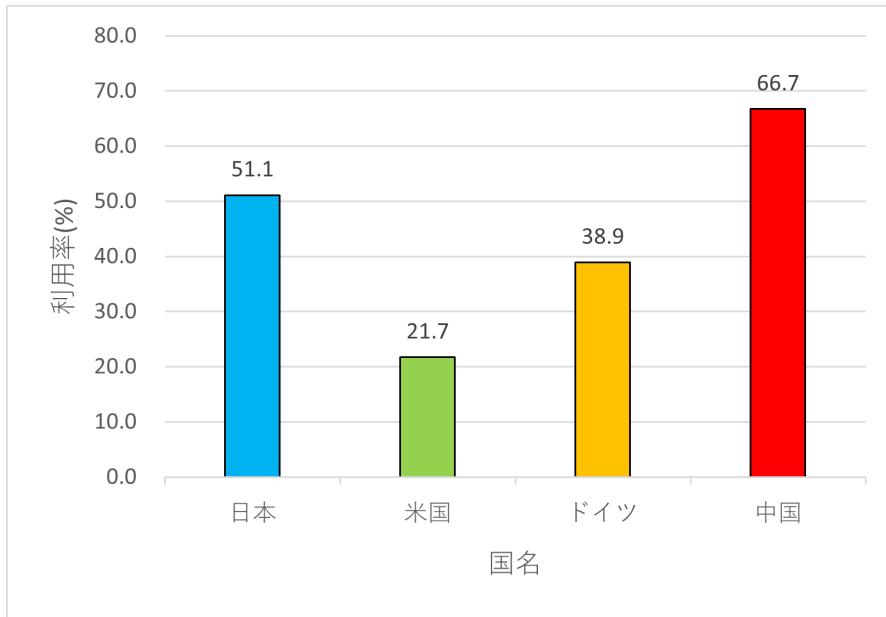


図 1.1: QR コード決済サービスの普及率 (各国比較)¹

最後に社会的な背景について述べる。これはQRコードの読み取りを可能にする電子機器、特にスマートフォンの普及に由来する。半導体製造技術の向上により、高性能、かつ低消費電力な電子デバイスが安価に手に入るようになったことで、2010年代からスマートフォンが急速に普及してきた。図1.2は、日本における電子機器の普及率推移を示したものである。ここで、グラフの横軸は、調査年を示し、縦軸は普及率(%)を示している。総務省の情報通信白書によると、日本においてスマートフォンの保有率は2010年で10%程度に留まっていたものが、2021年には90%近くに達している[3]²。このスマートフォンの普及は、誰もがQRコードを読み取り、情報を取得する事ができるという土台を作り、QRコードの普及を強く後押しした。

¹総務省（2021）「ウィズコロナにおけるデジタル活用の実態と利用者意識の変化に関する調査研究」(https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/r03_01_houkoku.pdf)を元に作成

²総務省 令和4年版 情報通信白書(<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/>)より引用

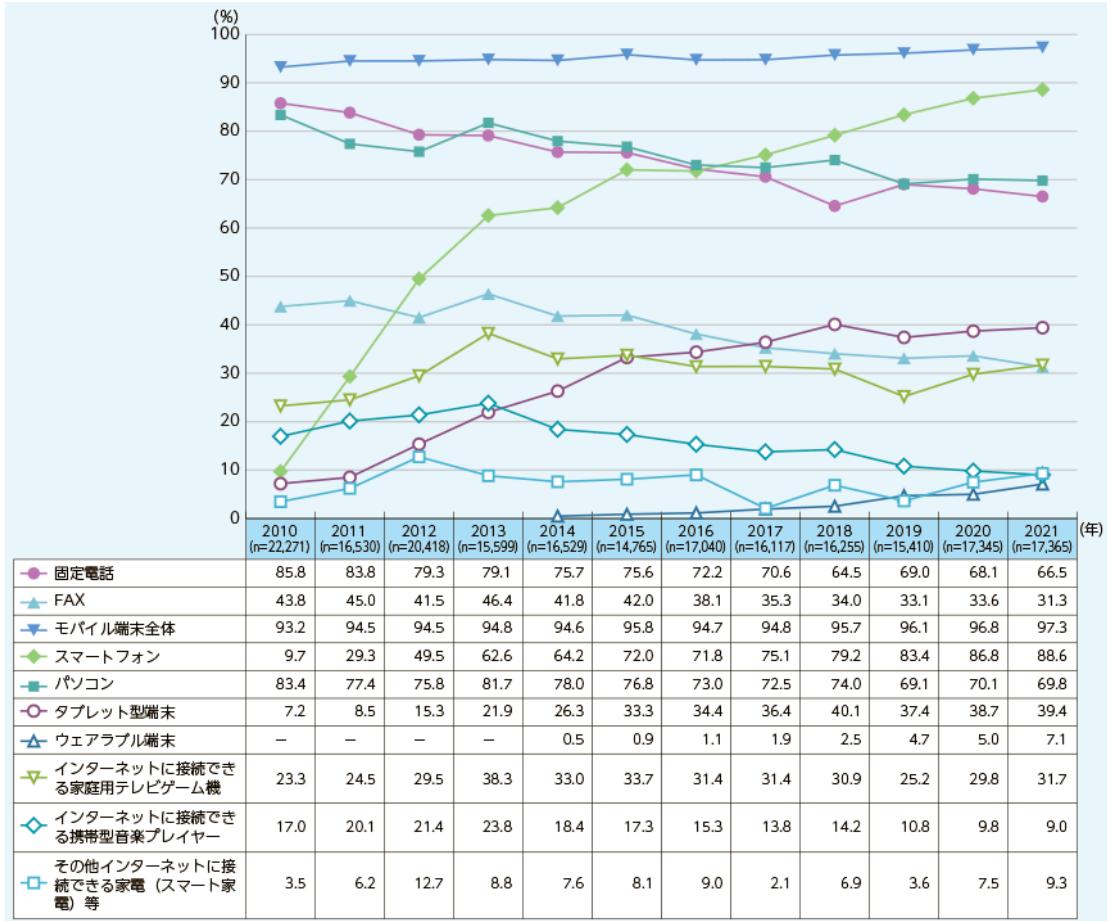


図 1.2: 電子機器の普及率の推移

1.2 QR コードについて

QR コード (Quick Response code) は、1994 年に株式会社デンソーの一事業部 (現株式会社デンソーウェーブ) によって開発された、高速、かつ安定した読み取りが可能なマトリクス型の 2 次元コードの一種である [4]。本コードの特徴的な形状は囲碁が元となっている。同様に広く普及している 1 次元バーコードと比較して、縦と横の 2 次元で情報を格納していることから、より大容量のデータをエンコードすることができ、なおかつ情報密度の高い印字をすることができる。ここで QR コードの構造について述べる。図 1.3 は QR コードの構造を簡易的に表したものである。コードを構成する白黒の正方形はセルと呼ばれる。このセルの組合せにより情報が表され、QR コード内部には、切り出しシンボル (図 1.3②)，タイミングパターン (図 1.3③)，アライメントパターン (図 1.3④)，フォーマット情

報(図 1.3⑤)が存在している.³



図 1.3: QR コードの構造⁴

各構造の要素について、それぞれ詳述する。

切り出しシンボル: 位置検出パターン、もしくはファインダーパターンとも呼ばれる。QR コードの 3 つの角に配置されており、「黒・白・黒・白・黒」の 1:1:3:1:1 の比率を持つ正方形パターンをもつ。QR コードの存在検出に使われ、画像中から QR コード領域を切り出す基準となる。

タイミングパターン: 切り出しシンボル同士を結ぶ黒と白が交互に並んだ直線状のパターンであり、最小セルの間隔推定に関わる。

アライメントパターン: 切り出しシンボルより小型の中央に黒点を持つ正方形パターンであり、QR コードのバージョンが上がるほどに QR コード中に含まれる数が増加する。局所的な歪みの補正に使用される。

³QR コードってどういう仕組み?種類や歴史、使用時の注意点などを解説 | KDDI トビラ (<https://time-space.kddi.com/ict-keywords/20190425/2624>) より引用

⁴QR コードってどういう仕組み?種類や歴史、使用時の注意点などを解説 | KDDI トビラ (<https://time-space.kddi.com/ict-keywords/20190425/2624>) より引用

フォーマット情報: QRコードの誤り訂正に関する情報を含む。誤り訂正方式の判定にかかる役割を持ち、正しいデータの復元を可能にする。

次に、QRコードの仕様により定められているバージョンについて述べる。QRコードは縦横を構成するセル数毎にバージョンが決められている(図1.4)。バージョンは1から40まで設定されており、例えば、バージョン1では 21×21 セル、バージョン40では 177×177 セルとなっている。最小サイズであるバージョン1では、数字で17文字、英数字で10文字、漢字で4文字、バイナリで7ビットのデータ表現が可能である。これに対し、最大サイズであるバージョン40では、数字で7,089文字、英数字で4,296文字、漢字で1,817文字、バイナリで2,953ビットと大容量のデータ表現が可能である。また、QRコードには3つの角に配置されている特徴的なパターンがある。このパターンをファインダーパターンもしくは位置検出パターンと呼ぶ。デコード時にはこのパターンを利用することで、QRコードの位置特定を行う。具体的には、3つの位置検出パターンを基準として、QRコードの向きや回転状態を検出し、正しい方向に補正する。その後、位置検出パターン間の距離を測定することでコードのサイズを認識し、3つのパターンの相対的な配置を基に、QRコード全体の四角形領域を特定する。

図1.5に示すように、A, B, Cのいずれの位置においても、白黒部分の幅の比率は1:1:3:1:1となっている。この比率はQRコードが回転した場合でも保持されるため、位置検出パターンの検出結果、及びそれらの位置関係から回転角度を認識することができる。その結果、360°いずれの方向からでも読み取りが可能となり、処理の効率化が実現されている。



図1.4: QRコードのバージョン⁵

⁵ [5]より引用

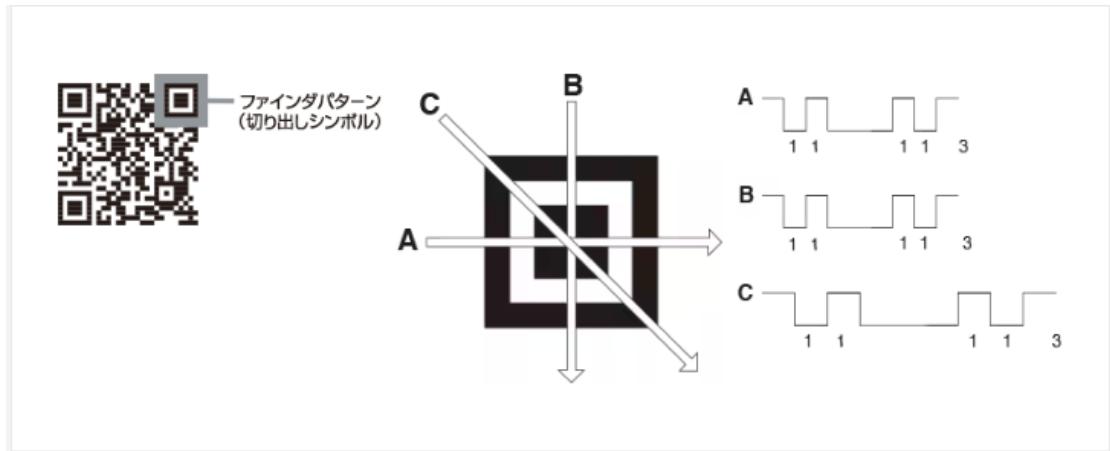


図 1.5: ファインダパターンの原理⁶

1.3 本研究の目的

本研究の目的は大きく二つに分けられる。一つ目は、QR コードのカラー化によって、面積当たりの情報量を増加させる事である。二つ目は、カラー QR コードの技術を用いて広告媒体等で他のデザインを損なわないような二次元コードを作成することである。

⁶ [6] より引用

第2章 カラーQRコードに関する先行研究

本章では、本研究に関するカラーQRコードに関する先行研究について述べる。

2.1 ステゴパネル

本研究のアイデアの元となった、肉眼では観認不可能な情報表示LEDパネルであるステゴパネルについて述べる。ステゴパネル(Stego-panel)とは、画像や音声などのデータに秘密情報を埋め込む情報秘匿技術の一種であるステガノグラフィー(Steganography)と、照明パネル(Panel)を組み合わせた造語である。ステゴパネルは、カメラで撮影することで、肉眼では観認できない情報を取得することが可能となる(図2.1及び、2.2)[7][8][9][10][11][12]。

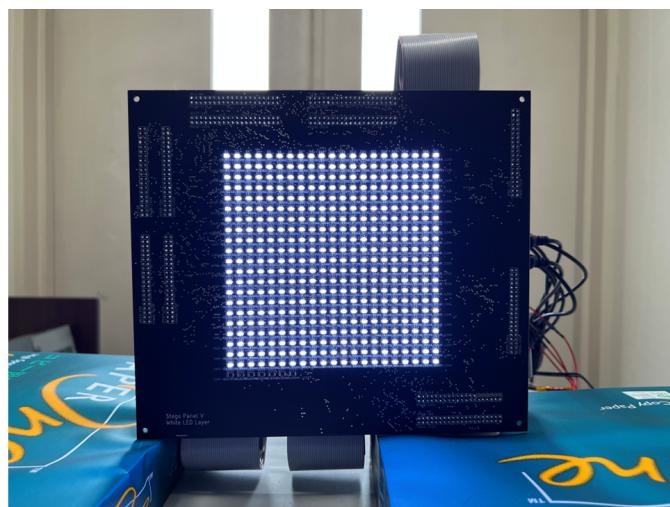


図2.1: 肉眼で観測したステゴパネル

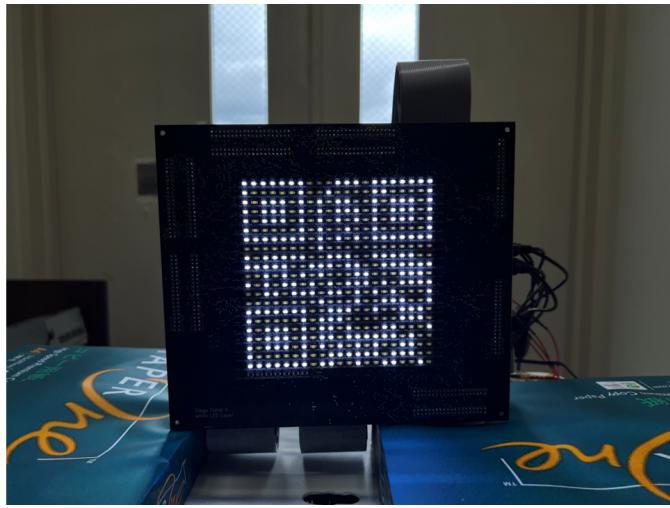


図 2.2: カメラで観測したステゴパネル

ステゴパネルの原理は、2種類の点滅周波数を利用したLEDの点灯制御である。人の肉眼はおよそ 60 Hz 以下の点滅しか認識することはできない。反対に、60 Hz 以上の点滅は、肉眼には常時点灯していると視認される。このような現象は残像現象と呼ばれる [13]。一方で、カメラによる撮影では、露光時間を制御することにより、肉眼に比べて瞬間の光を観測することができる。従って、カメラで高速点滅している照明やデジタルサイネージを撮影したときに、画像中に縞模様のノイズが表示される(図 2.3)。このような、ちらつき(Flicker)に由来するノイズはフリッカーノイズと呼ばれる。

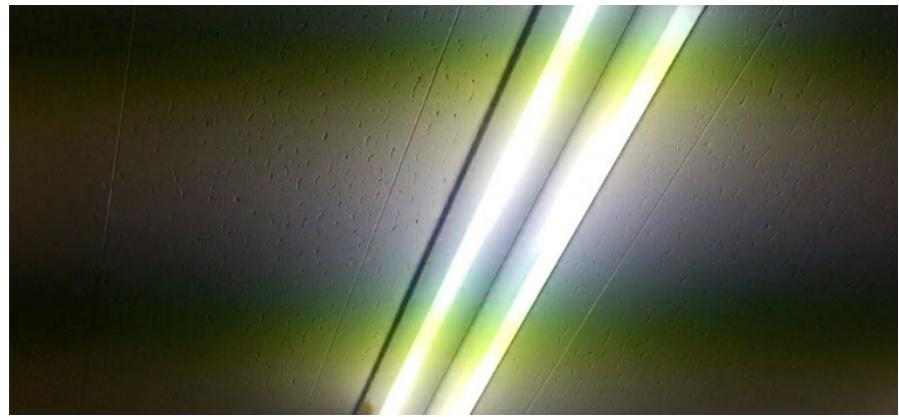
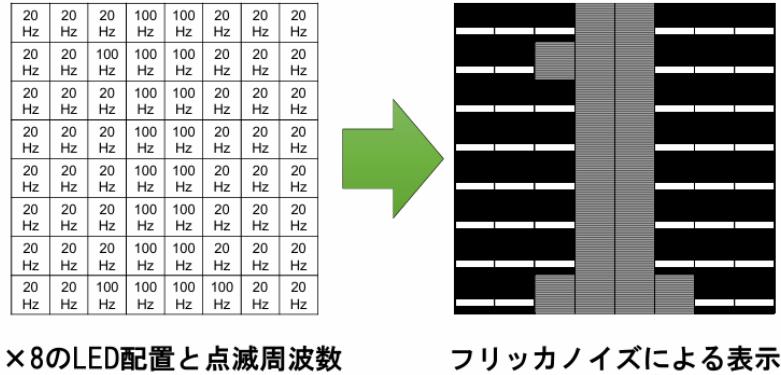


図 2.3: フリッカーノイズが入ったカメラ画像

図 2.4は、ステゴパネルの点滅周波数と文字表現の仕組みを簡易的に表したものである。ここでは、LEDの点滅周波数を 20 Hz, 及び 100 Hz と仮定している。ステゴパネルでは、文字情報部分と背景部分で違う点滅周波数を使用することで情報の秘匿を実現している。

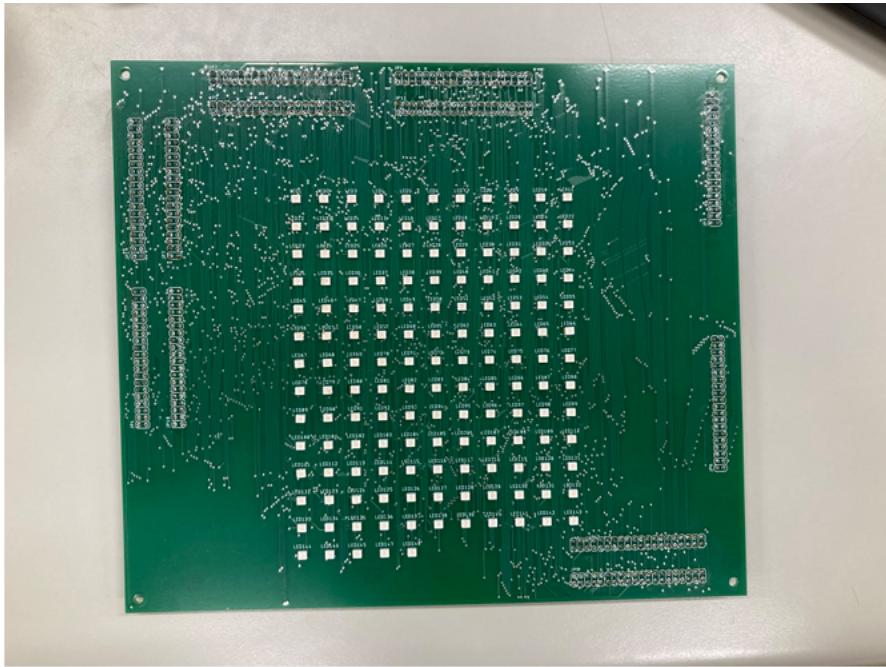


8×8のLED配置と点滅周波数

フリッカノイズによる表示

図 2.4: ステゴパネルの点滅周波数と文字表現の仕組み

以上のように、ステゴパネルとは、周波数の違いを利用して異なる情報を表示する技術である。更に論文 [14] では、ステゴパネルを使用してカラーマイクロ QR コードの検出評価を行っている。この研究では、RGB カラー表現が可能であるステゴパネル V 用に、RGB マイクロ QR コード層を実装し(図 2.5, 及び 2.6), フリッカカラーマイクロ QR コードの検出率について、画像処理や撮影距離、色といったパラメータの影響について評価を行っている。本研究の結果として、画像処理のパラメータについて、距離に応じて適切なカーネルサイズや処理回数が存在すると結論付けている。

図 2.5: ステゴパネル V の RGB マイクロ QR 層¹

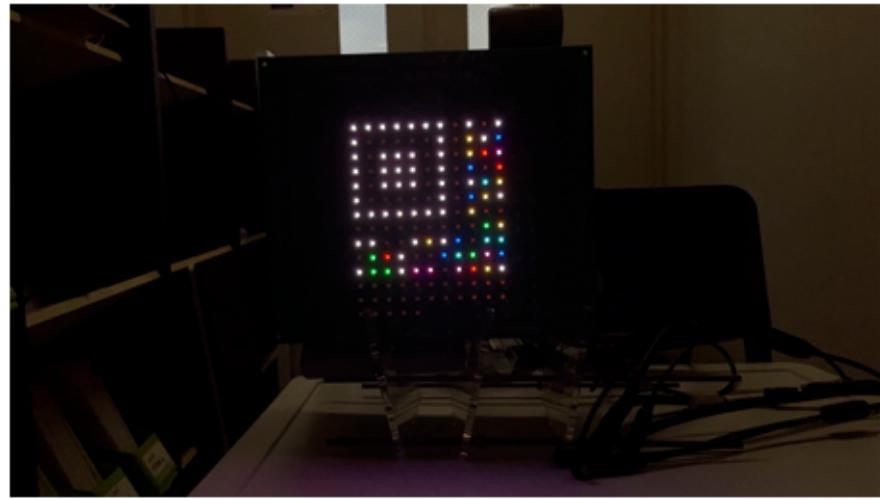


図 2.6: RGB マイクロ QR 層によるマイクロ QR コード表示²

2.2 三重大学 寺田らによる研究

論文 [15] では、実用化されているカラーコードをまとめたうえで、それらに使用されている色数の少なさを課題としている。その解決策として、正確な色認識技術を提案し、ニューラルネットワークを用いた色の補完技術を構築している。更には、色補完技術の評価対象としてカラー QR コードを挙げ、色の認識技術に対する実験を行いその有効性を確認している。

この論文では、カラー QR コードを用いた認識実験として、2種類の実験を行っている。

- A. ニューラルネットワークに対する入力画像として、カラーサンプル画像(図 2.7)を使用した実験
- B. ニューラルネットワークに対する入力画像として、学習用カラー QR コード(図 2.8, 及び 2.9)を使用した実験

各実験では、日付を変えて元データを撮影した画像をニューラルネットワークに学習させている。これにより作成した色認識技術と従来手法である閾値による色認識術との比較評価を行っている。比較対象には、使用色 8 色のカラー QR コード(図 2.10)と、使用色 64 色のカラー QR コードを使用している(図 2.11)。

² [14] より引用



図 2.7: カラーサンプル画像の元データ³

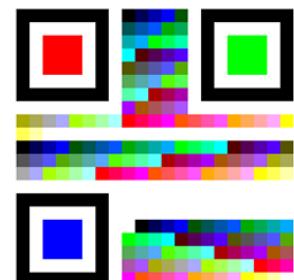


図 2.8: 学習用カラー QR コードの元データ (パターン A)¹

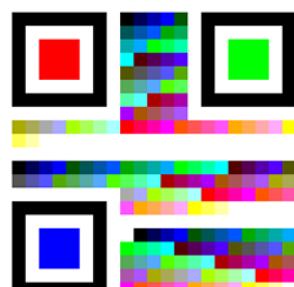
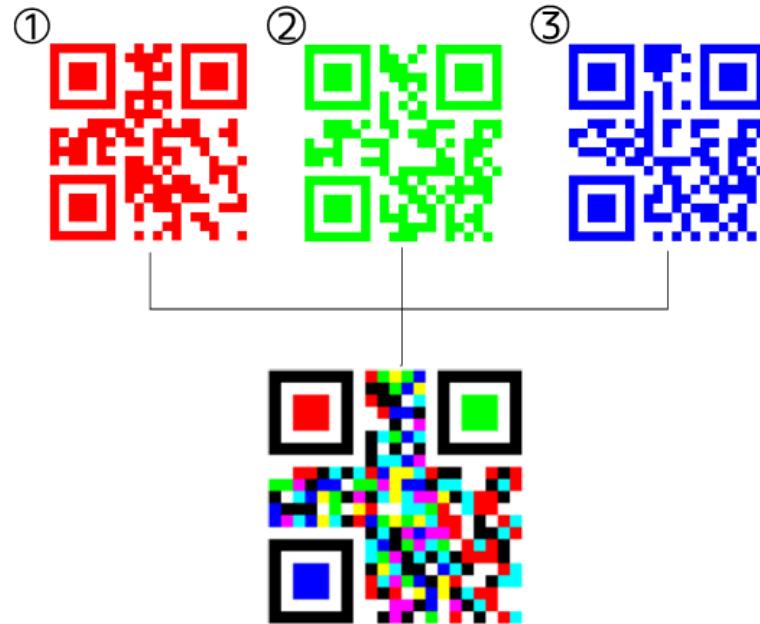
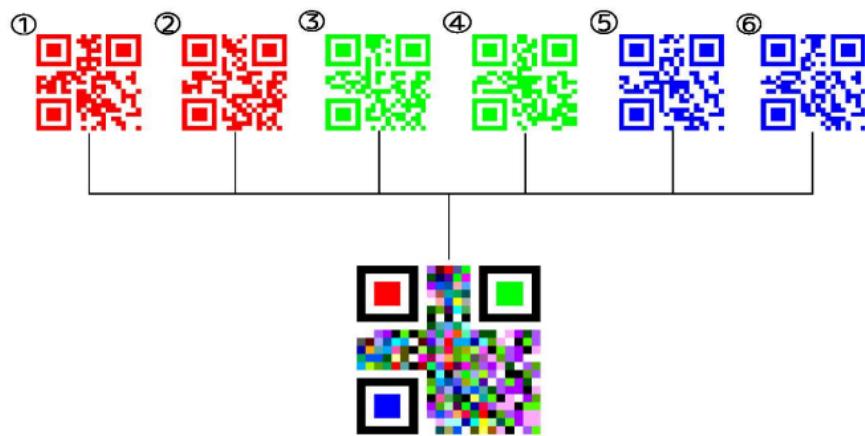


図 2.9: 学習用カラー QR コードの元データ (パターン B)¹

図 2.10: 使用色 8 色のカラー QR コード¹図 2.11: 使用色 64 色のカラー QR コード¹

2.3 Henryk Blasinski らによる研究

QR コードのカラー化に関する研究は、日本のみならず、海外でも行われてきた。論文 [16] では、カラー QR コードの実装において、大きな課題となる色干渉 (color interference) について述べている。また、この課題に対し、印刷色材チャネルと撮

³ [15] より引用

影時の色チャネル間のチャネル間干渉の影響を軽減する事を目的として、印刷過程と撮影過程の物理的に動機付けられた数学モデルに基づいて、干渉除去アルゴリズムの開発を行っている(図 2.12)。性能を評価した実験の結果として、提案フレームワークは色干渉の影響をうまく克服し、対応する誤り訂正方式と併用することで、各色チャネルに対して低いビットエラー率と高いデコード率を実現することが示されたとしている。

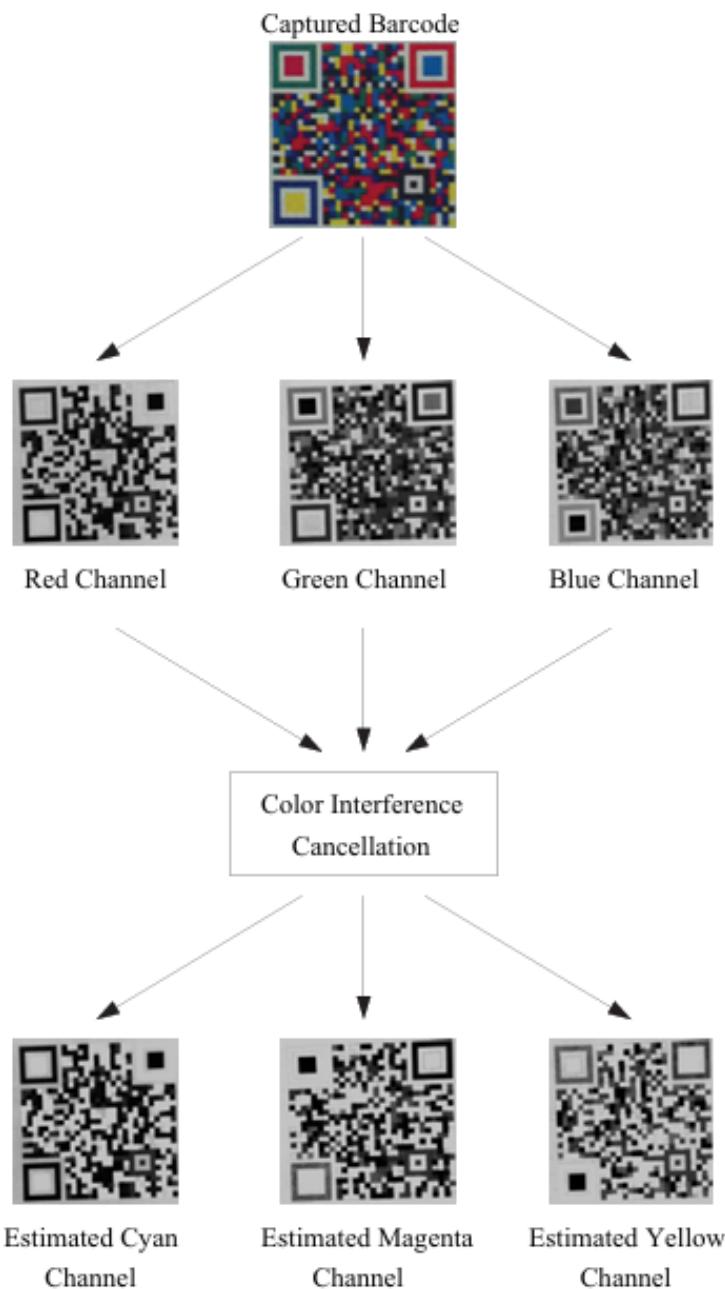


図 2.12: Blasinski による色干渉除去アルゴリズムの開発⁴

2.4 Nutchanad Taveerad らによる研究

QR コードの情報容量を増加させる手法として、モジュールを多色化するカラー QR コードが提案されている。Taveerad らは、16 色のカラーパレットを用いることで、1 モジュールあたり 4 ビットの情報を格納する方式を提案した [17]。この手法では、HSV 色空間を用いて色を管理し、デコード時には RGB 画像を HSV に変換後、K-means クラスタリングにより各モジュールの色判定を行っている。実験結果より、PC 上の画像ファイルからの読み取りでは 100% の精度を示す一方で、スマートフォンカメラによる撮影画像では読み取り精度が 75% まで低下し、照明条件によって更に悪化することが報告されている(図 2.13)。これは、RGB 値が撮影環境に大きく依存するため、色判定が安定しないことを示している。

この結果は、「色数を増やすことで容量は増加するが、色をそのまま情報として扱うと読み取り信頼性が著しく低下する」というカラー QR コードの根本的課題を示している。

⁴ [16] より引用

Image	Device	Source	Accuracy (%)
	Mobile device (Android)	Camera	75
	Personal computer	File	100
	Mobile device (Android)	Camera	100
	Personal computer	File	100

図 2.13: カラー QR コードの検出結果⁵

⁵ [17] より引用

第3章 カラーQRコードエンコード/ デコードシステムの開発

本章では、カラーQRコードの読み取りシステム開発について述べる。はじめに、3.1、及び3.2節で、エンコード方法とデコード方法を述べ。3.3節で読み取りアプリの開発について述べる。

3.1 研究目的

近年、スマートフォンに搭載されるカメラの解像度・ダイナミックレンジ・色再現性は著しく向上している。表3.1は、apple社製iPhoneの歴代発売年と機種、搭載カメラの画素数をまとめたものである。

表 3.1: 歴代 iPhone 機種に搭載されたカメラの画素数比較¹

発売年	機種	画素数
2025	iPhone 17	4,800万
2024	iPhone 16	4,800万
2023	iPhone 15	4,800万
2022	iPhone 14	1,200万
2021	iPhone 13	1,200万
2020	iPhone 12	1,200万
2019	iPhone 11	1,200万
2017	iPhone X	1,200万
2017	iPhone 8	1,200万
2016	iPhone 7	1,200万
2014	iPhone 6	800万
2012	iPhone 5	800万
2010	iPhone 4	500万
2008	iPhone 3G	200万

¹SoftBank—よくあるご質問(FAQ) [iPhone] カメラの画素数はどのくらいですか?
—<https://www.softbank.jp/support/faq/view/11825> 及び, apple—iPhoneのモデルを識別

一方で、カラー QR コードに関する先行研究の多くは約 10 年前に行われたものであり、当時のカメラ性能や撮影環境を前提として評価がなされている。また、それらの研究の多くは紙媒体に印刷された QR コードを対象とした評価であり、現在広く普及しているデジタルサイネージ等のディスプレイ表示を対象とした検証は十分に行われていない。

しかし現代においては、広告・案内表示・店舗情報提示などの用途で、ディスプレイ上に QR コードを表示し、スマートフォンで読み取る利用形態が一般的になっている。このような表示環境では、印刷媒体とは異なり、発光色・画素構造・表示輝度などの特性が読み取りに影響を与えると考えられる。そこで本研究では、RGB の重ね合わせによるカラー QR コードに対して、エンコード/デコードを行うシステムを構築し、その評価として、カラー QR コードとモノクロ QR コードの距離に応じた検出率の比較実験を行った。さらに、システムにおける撮影画像に対する後処理の有効性を調べた。

3.2 エンコード方法

カラー QR コードの読み取りシステムに使用するエンコード方法を示す。はじめに、任意の文字列が一般の QR コード生成して、仕様によりモノクロの QR コードが作成される。同様に、3 つの文字列をもとに 3 種類のモノクロ QR コードを用意する。この 3 種類のモノクロ QR コードを単色のカラー画像に変換する。本システムでは、赤 (R), 緑 (G), 青 (B) の三色に変換している。その後、3 種類の単色カラー画像を加法混色(図 3.1)により重ね合わせることで、カラー QR コードが作成される(図 3.2)。カラー QR コードは、赤、緑、青色の各色が画素値として 0 か 255 のどちらかの値をとる。つまり、 $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$ 通りの色で表される。ここで 8 通りの色とは、白、黒、赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエローの 8 種類となる。画素値を (R, G, B) で表記すると、各色はそれぞれ、白 (255, 255, 255), 黒 (0, 0, 0), 赤 (255, 0, 0), 緑 (0, 255, 0), 青 (0, 0, 255), シアン (0, 255, 255), マゼンタ (255, 0, 255), イエロー (255, 255, 0) である。これらの仕様に基づき、カラー QR コードをエンコードするプログラムを作成した(付録 6.2.2)。

する—<https://support.apple.com/ja-jp/108044> より引用

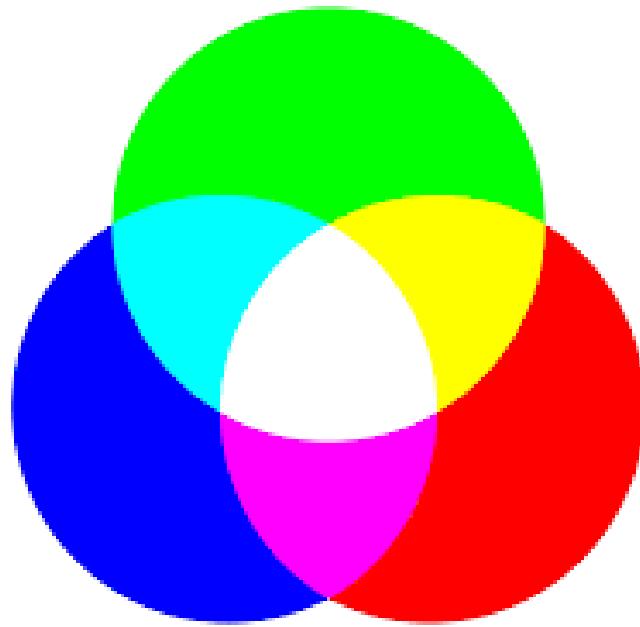


図 3.1: 加法混色

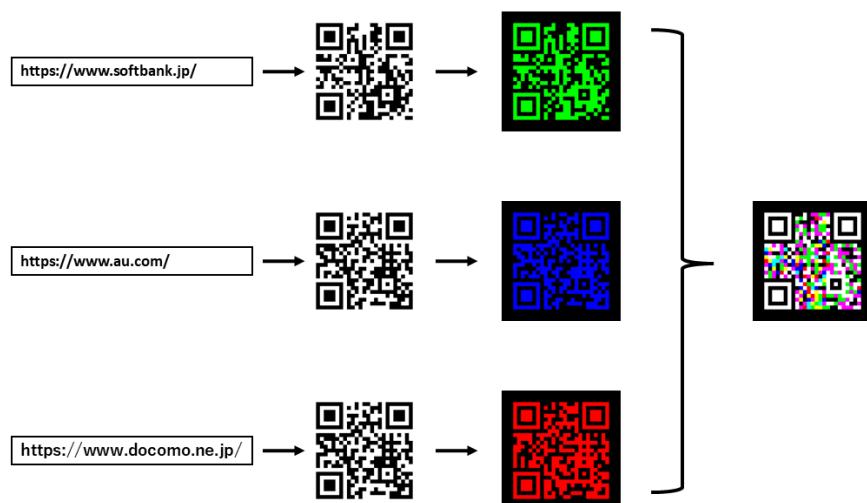


図 3.2: カラー QR コードのエンコード方法

3.3 色空間について

コンピュータ上で画像は、色の数値の組み合わせによる色空間により表現されている。最も主要な色空間としてRGB色空間[18]が挙げられる。RGB色空間ではR(赤), G(緑), B(青)に0~255までの値が格納され、その値の組み合わせにより色が表現される。例として $(R, G, B) = (255, 165, 0)$ のとき、橙色となり、 $(R, G, B) = (255, 165, 0)$ のとき、灰色が表現される(図3.3)。また、別の色空間としてHSV色空間が挙げられる。HSV色空間[19]とは、色を色相(H), 彩度(S), 明度(V)の3成分で表現する色空間のことである。HSVとは、Hue(色相), Saturation(彩度), Value(明度)の頭文字に由来している。HSV色空間を用いた色の表現例が図3.4である。RGB色空間がデバイス依存の色表現であるのに対して、HSV色空間は人間の色知覚に近い直感的な表現を目的として提案された。HSV色空間を使用する利点として、より正確な色抽出が可能な点が挙げられる。HSV色空間において、色の種類はH成分によって決定されるため、照明等による明るさの影響を抑えたロバスト性の高い色抽出が可能になる。従って、本研究で使用するプログラムでは、取得した撮影画像を、HSV色空間に変換した後に、色抽出を行う手法を採用する。



図3.3: RGB色空間における色の表現例

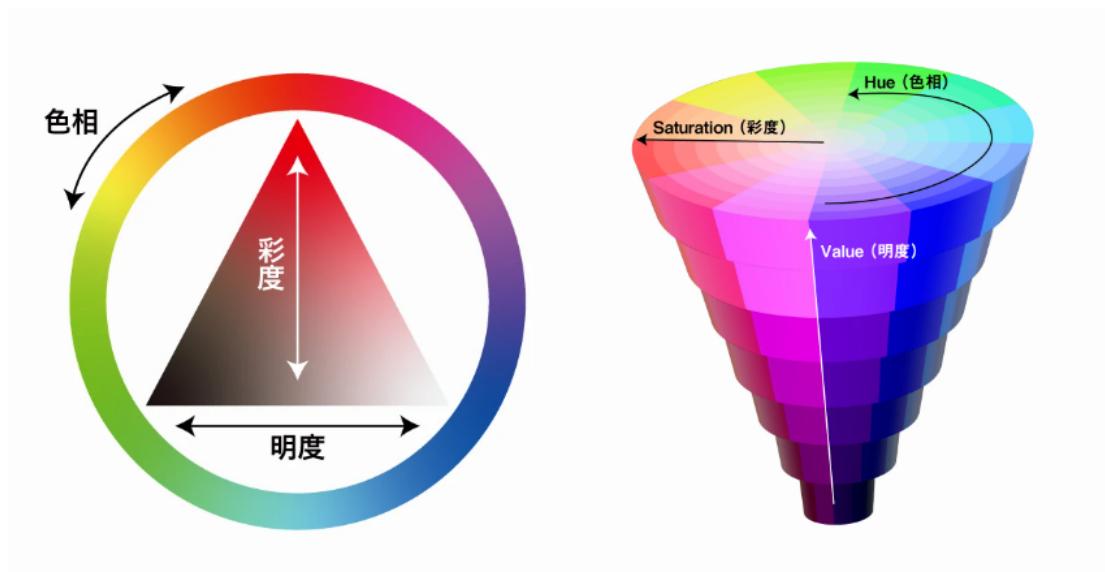


図 3.4: HSV 色空間での色の表現方法²

3.4 デコード方法

図 3.5は、カラーQRコードの読み取りシステムにおけるデコード方法を示したものある。はじめに、カラーQRコードに対して、画像処理による色の抽出を行う。デコードのフローチャートが図3.6である。

²321web—色の三属性「色相」「明度」「彩度」とは?【HSB/HSV】(<https://321web.link/color-attribute/>) より引用

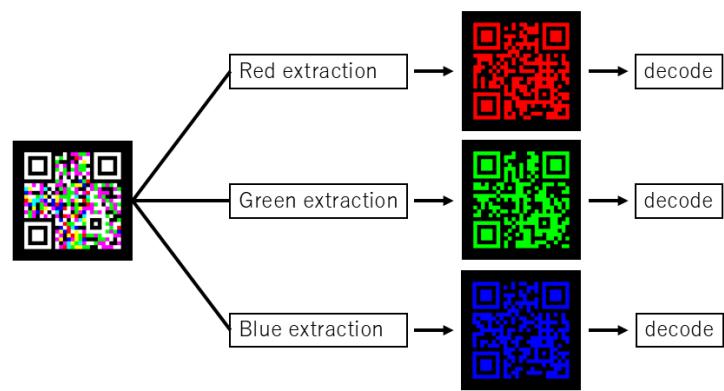


図 3.5: カラー QR コードのデコード方法

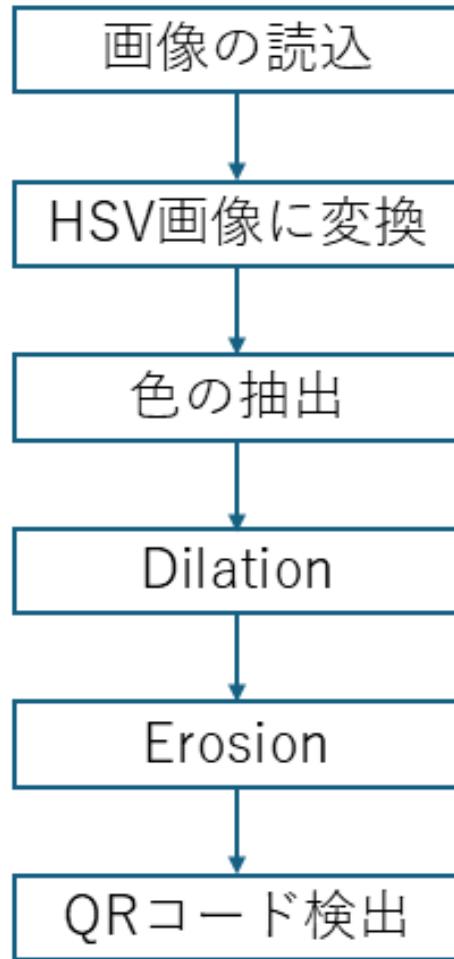


図 3.6: デコード時のフローチャート

ここで、膨張 (dilation) 処理と収縮 (erosion) 処理について詳しく述べる。膨張処理とは、画像中の指定個所を太くする処理のことである。例えば、白色の箇所に対して膨張処理を行う場合、対象とする構造要素 (カーネル) に対して、周囲も白色に塗りつぶすような処理が行われる。膨張処理の処理イメージが図 3.7 である。

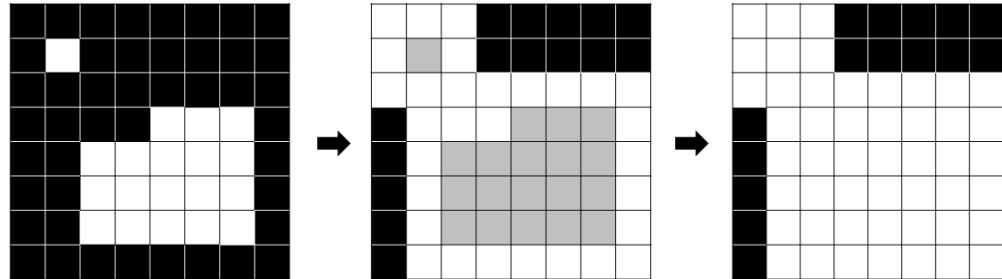


図 3.7: 膨張処理のイメージ

次に、収縮処理とは、画像中の指定個所を細くするような処理のことである。例えば、白色の箇所に対して収縮処理を行う場合、対象とする構造要素(カーネル)に対して、周囲の黒い画素に浸食されるような処理が行われる。収縮処理の処理イメージが図 3.8 である。

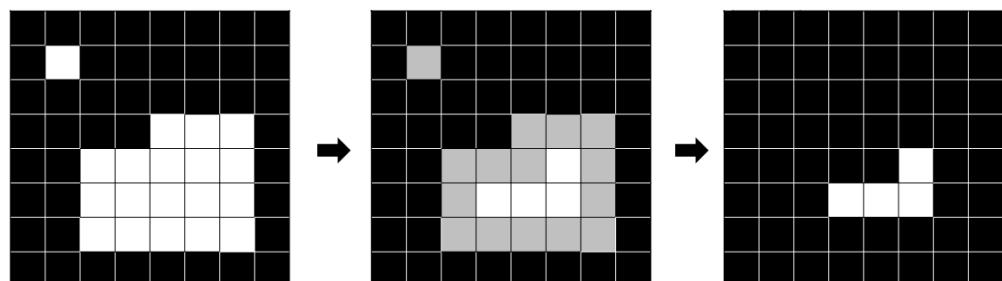


図 3.8: 収縮処理のイメージ

このように画像の形状を整えるような処理を総称してモルフォロジー処理と呼

ばれる。また、収縮の後に膨張を行う処理をオープニング(opening)処理、膨張の後に収縮を行う処理をクロージング(closing)処理と呼ぶ。本システムでは、ノイズ除去を目的として、クロージング処理を適用している。

また、色の抽出処理に関しては、OpenCVによるマスクの生成を使用している。図3.9は、カラーQRコードの読み取りアプリの一部である。ここでは、赤色に対する色の抽出処理を行っている。ここで、取得された画像は、cv2.cvtColorにより、RGB画像から、HSV画像に変換される。次に、np.arrayにより、各色の範囲が定義される。赤色が抽出される範囲には黄色や、マゼンタも含まれるため、それぞれ定義がなされる。さらに、cv2.inRangeにより、抽出したペーツ同士のマスクが生成される。最後に、cv2.bitwise_orを用いて、別々に抽出した白、赤、黄、マゼンタの範囲が結合される。ここで定義された範囲を黒に塗りつぶし、他の領域を白に塗りつぶすことで、カラーQRコードから個別のQRコードが抽出される。

```

80
81 # BGRからHSVに変換
82 hsv_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2HSV)
83
84 # 赤要素の抽出
85 if i == 0:
86     # 白色範囲
87     lower_white = np.array([0, 0, 100])
88     upper_white = np.array([180, 60, 255])
89
90     # 赤色範囲 [0-180の範囲で設定]
91     lower_red1 = np.array([0, 80, 100])
92     upper_red1 = np.array([15, 255, 255])
93     lower_red2 = np.array([165, 80, 100])
94     upper_red2 = np.array([180, 255, 255])
95
96     # 黄色範囲
97     lower_yellow = np.array([15, 80, 100])
98     upper_yellow = np.array([45, 255, 255])
99
100    # マゼンタ範囲
101    lower_magenta = np.array([135, 80, 100])
102    upper_magenta = np.array([165, 255, 255])
103
104    # 各色のマスクを作成
105    mask_white = cv2.inRange(hsv_image, lower_white, upper_white)
106    mask_red1 = cv2.inRange(hsv_image, lower_red1, upper_red1)
107    mask_red2 = cv2.inRange(hsv_image, lower_red2, upper_red2)
108    mask_yellow = cv2.inRange(hsv_image, lower_yellow, upper_yellow)
109    mask_magenta = cv2.inRange(hsv_image, lower_magenta, upper_magenta)
110
111    # 赤色の2つのマスクを結合
112    mask_red = cv2.bitwise_or(mask_red1, mask_red2)
113
114    # 白、赤、黄、マゼンタのマスクを結合して黒にする領域を指定
115    mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_white, mask_red)
116    mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_yellow)
117    mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_magenta)
118
119    # すべての領域を白に塗りつぶし
120    result = np.ones_like(image) * 255
121
122    # マスクで指定された領域を黒に変換
123    result[mask_to_black > 0] = [0, 0, 0]
124

```

図3.9: 赤色に対する色の抽出処理

3.5 読み取りアプリの開発

前述のエンコード、デコード方法を使用して、読み取りアプリの開発を行った。開発にあたり Python 製の軽量 Web フレームワークである Flask を使用し、画像保存時のデータベースとしては、SQLite を使用した。また、バックエンド側の画像処理には、OpenCV を使用した。さらに、QR コードの認識には、ZBar を Python から利用するライブラリである pyzbar を使用した。ここで、Zbar とは、バーコードや QR コードなどの 2 次元コードを読み取る為の、フリーかつオープンソースで利用できるライブラリのことである。

開発したアプリにスマートフォン端末からアクセスした際の表示画面が図 3.10 である。本システムの実装はノート PC にローカルのサーバーを立てることで実装を行った。従って、スマートフォンをローカルサーバーと同一の Wi-Fi に接続するなど、同一のネットワーク内のみで動作検証が可能である。ユーザーは”ファイルを選択”ボタンからカメラによる画像撮影が可能である。次に、画面中央の各色の抽出ボタンを選択可能である。各ボタンを押すことで、抽出する色の種類を選択することが可能であり、バックエンド側での画像処理が実行される。QR コードが検出された際には、検出先の URL へ遷移される。また、QR コード不検出の場合には、画面中央にポップアップが表示される(図 3.11)。



図 3.10: 読み取りアプリの web 画面表示

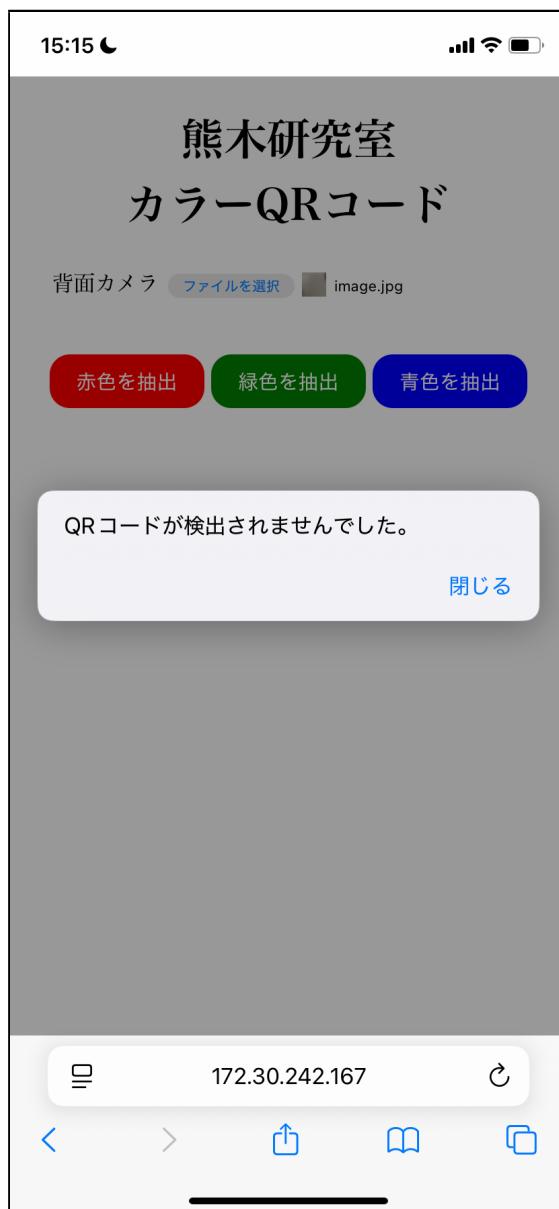


図 3.11: QR コード不検出時の web 画面表示

第4章 検出性能の比較実験

本章では、従来のモノクロ QR コードとカラー QR コードの検出率による比較実験について述べる。はじめに、4.1 節で実験手法について述べ、4.2 節で実験結果について述べる。また、4.3 節では実験に対する考察を述べる。

4.1 評価実験 1

実験に際して、10種類のカラー QR コード画像を用意した。これは、カラー QR コードの種類による検出への影響を調べる為である。用意した10種類のカラー QR コードが図 4.1 である。これらのカラー QR コードは、ランダムに生成した10 文字の半角英数字を3種類用意し、先頭にサンプル番号を追加した計11文字の半角英数字をエンコードすることで作成している（表 4.1）。ここで、サンプル番号とは sample2 であれば、数字の 2 を表す。また、画像の撮影には、apple 社製のスマートフォン端末である iPhone XR を使用した。搭載されている背面カメラの画素数は 1200 万画素である¹。画像撮影に使用したアプリケーションは、iPhone XR 標準搭載のカメラアプリである。作成したカラー QR コードサンプル画像の表示には同社製のスマートフォン端末 iPhone 12 mini を使用した。iPhone 12 mini の解像度は、 $2,340 \times 1,080$ ピクセルである²。

撮影距離について、20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm の 5 種類から撮影を行った。撮影時の実験環境を図 4.2 に示す。

¹iPhone XR - 技術仕様—<https://support.apple.com/ja-jp/111868> より引用

²iPhone 12 mini - 技術仕様—<https://support.apple.com/ja-jp/111877> より引用

表 4.1: カラー QR コードサンプルに使用した文字列

	赤	緑	青
sample0	0bu2rh5g1aa	0xox7ljdot4	0warg1fs2qj
sample1	1ajauukb8mj	1sjw40ypu0l	1klos4n5aq6
sample2	2arwtbe1h2x	2tndp3aqedx	2ptohyekclg
sample3	3apa5k0sxwa	3viyx8b2ndm	3nmrc7u0tb4
sample4	4deeqtvrucr	4wf5i1dsksi	4usyhe4fa31
sample5	5hjfteyeqim	5sf11bex4a3	5juyka6nm5g
sample6	6aekcjml32b	6i4d2i0q5le	6b3e3up784p
sample7	7cnk4rjdsuy	7frelcmy6lh	7e3qbglmuru
sample8	8anykgc3hhr	8y3mt7irhcr	8mia1e7bbxr
sample9	9sa1vx44ni4	9xiicrmnow8	9vjkso2sccd



図 4.1: 実験に使用したカラー QR コード画像

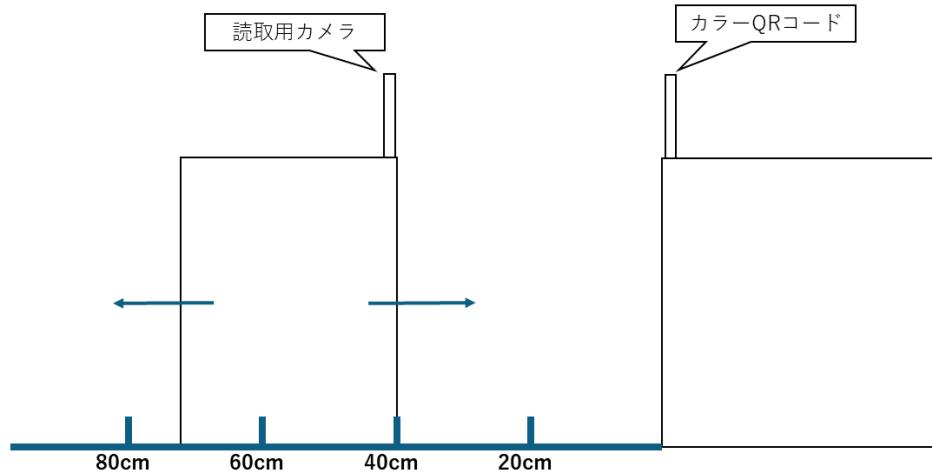


図 4.2: 実験時の画像撮影環境

撮影した画像を以下に示す。画像はそれぞれ、撮影距離 20 cm, 撮影距離 40 cm, 撮影距離 60 cm, 撮影距離 80 cm, 撮影距離 100 cm を表している。

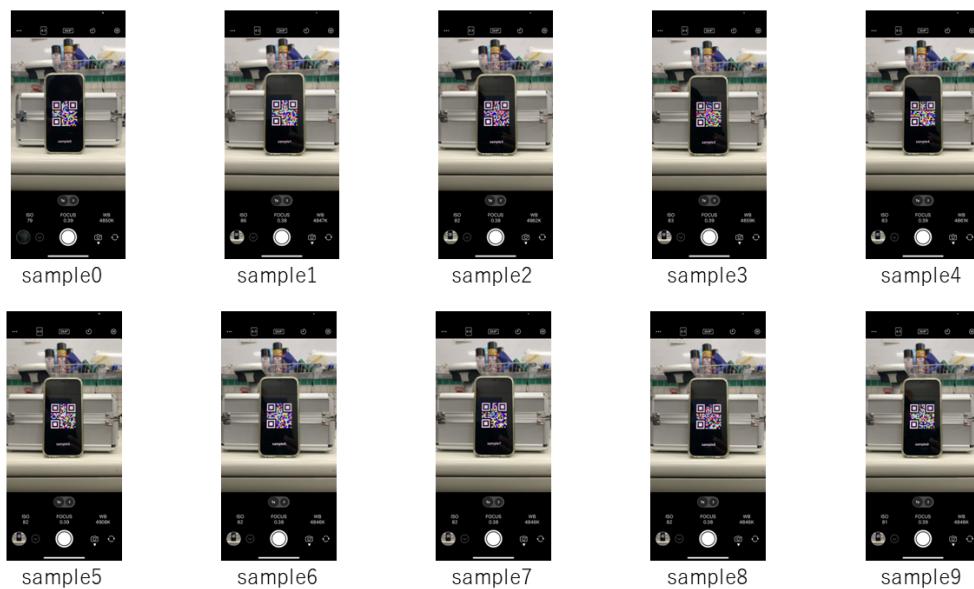


図 4.3: 距離 20 cm から撮影したときの画像

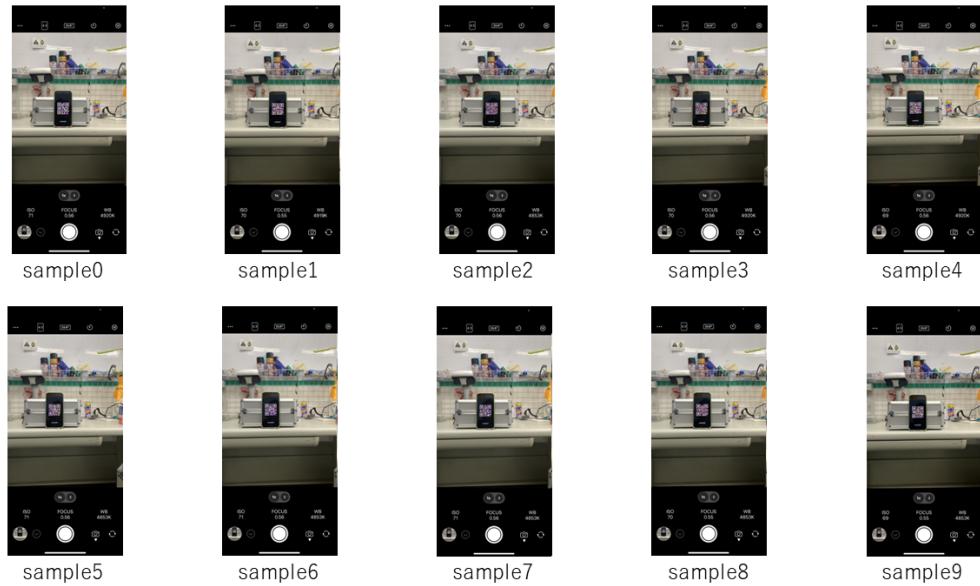


図 4.4: 距離 40 cm から撮影したときの画像

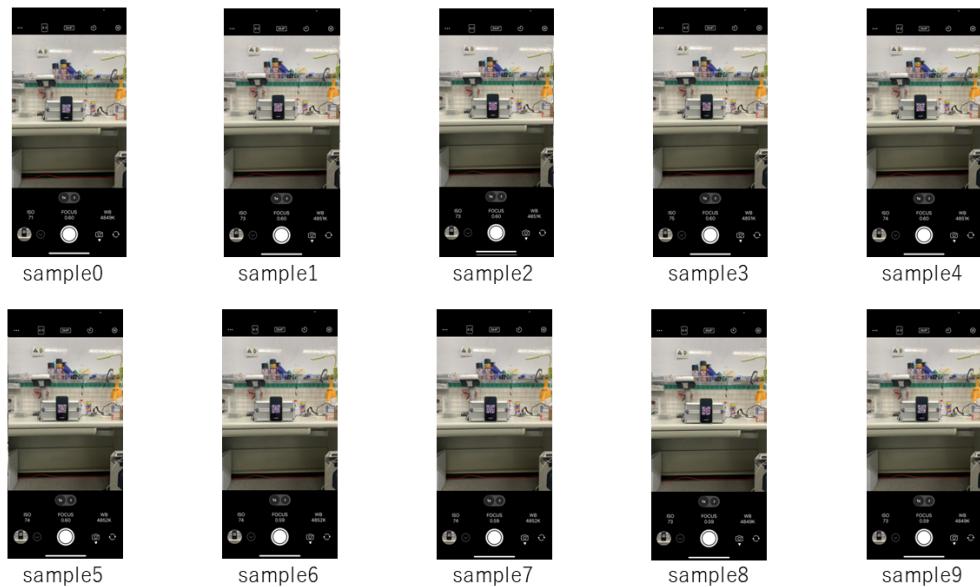


図 4.5: 距離 60 cm から撮影したときの画像

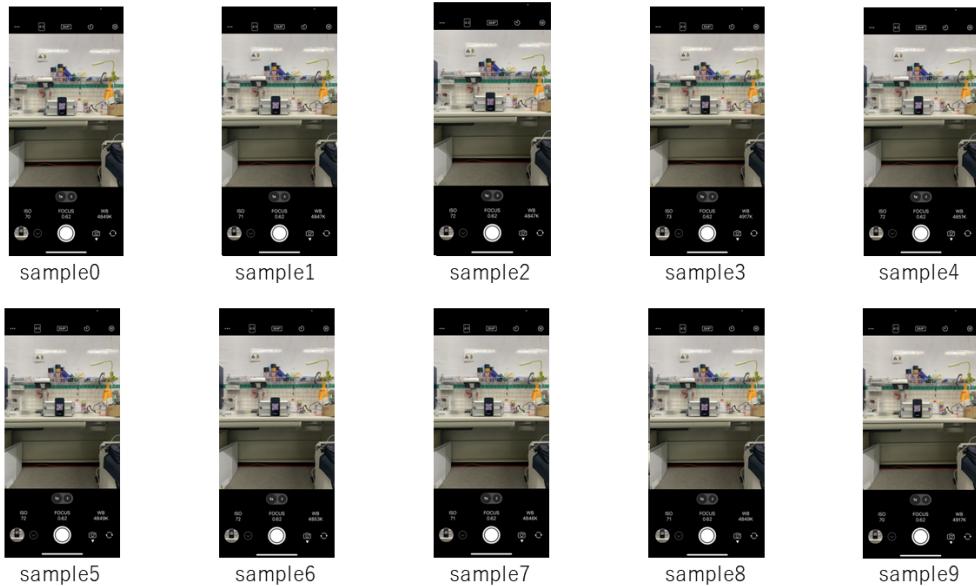


図 4.6: 距離 80 cm から撮影したときの画像

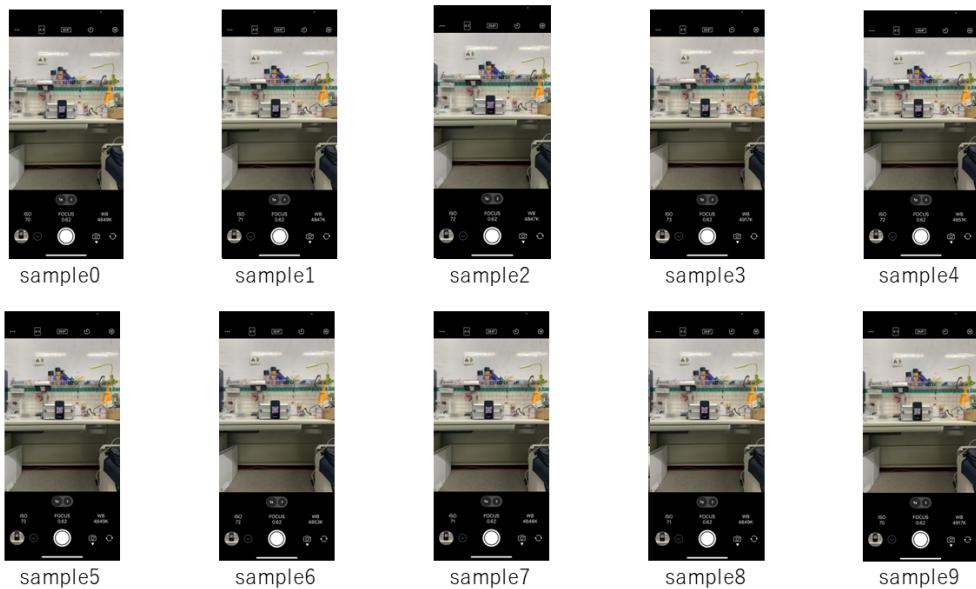


図 4.7: 距離 100 cm から撮影したときの画像

比較対象として、従来のモノクロ QR コードの撮影を行った。撮影された画像をまとめたものが図 4.8 である。

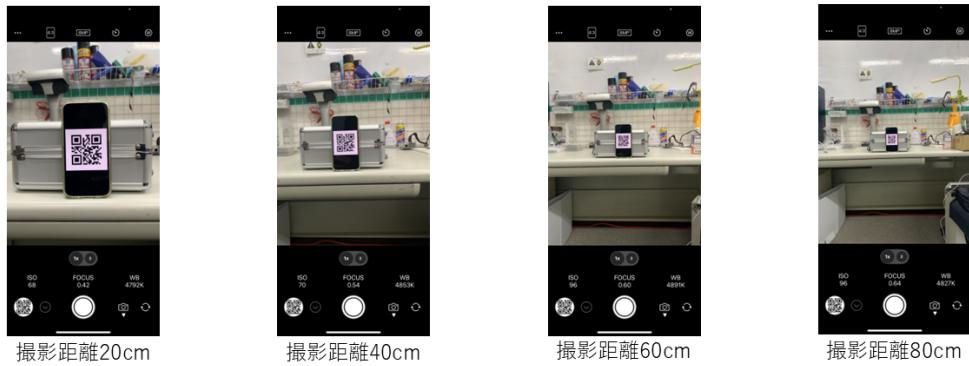


図 4.8: 比較対象とするモノクロ QR コードの画像

4.2 実験結果 1

はじめに、カラー QR コードに対して、色抽出処理のみを行って、その検出率の比較を行った。結果を表形式でまとめたものが表 4.2である。

表 4.2: 色抽出処理のみを行った際の検出率の比較 [%]

	distance20cm	distance40cm	distance60cm	distance80cm	distance100cm
Blue	100	100	100	0	0
Green	100	100	100	0	0
Red	100	100	100	10	0

実験の結果を踏まえ、膨張処理を加えたうえで検出率の比較を行った。膨張処理に適用するカーネルサイズはそれぞれ、 5×5 , 4×4 , 3×3 , 2×2 を使用した。各カーネルサイズでの検出率をまとめたものが表 4.3, 4.4, 4.5, 及び 4.6である。

表 4.3: 膨張処理時にカーネルサイズ 5×5 を適用した際の検出率 [%]

	distance20cm	distance40cm	distance60cm	distance80cm	distance100cm
Blue	100	100	90	0	0
Green	100	100	90	0	0
Red	100	100	100	0	0

表 4.4: 膨張処理時にカーネルサイズ 4×4 を適用した際の検出率 [%]

	distance20cm	distance40cm	distance60cm	distance80cm	distance100cm
Blue	100	100	100	0	0
Green	100	100	100	0	0
Red	100	100	100	10	0

表 4.5: 膨張処理時にカーネルサイズ 3×3 を適用した際の検出率 [%]

	distance20cm	distance40cm	distance60cm	distance80cm	distance100cm
Blue	100	100	100	0	0
Green	100	100	100	0	0
Red	100	100	100	10	0

表 4.6: 膨張処理時にカーネルサイズ 2×2 を適用した際の検出率 [%]

	distance20cm	distance40cm	distance60cm	distance80cm	distance100cm
Blue	100	100	100	0	0
Green	100	100	100	0	0
Red	100	100	100	10	0

これに対し、従来のモノクロの QR コードは、距離 100 cm からでも読み取りが可能であった。

4.3 考察 1

実験の結果として、膨張処理の追加による検出率の向上は見られなかった。これは、画像処理の対象となる QR コード部分の解像度の低さが問題であると考えられる。膨張処理前の画像と膨張処理後の画像は図 4.9、及び図 4.10 のとおりである。モルフォロジー処理に使用したカーネルサイズが対象とする QR コード領域に対して大きかったことで、想定したような色抽出後の画像補正がなされなかつたと考えられる。

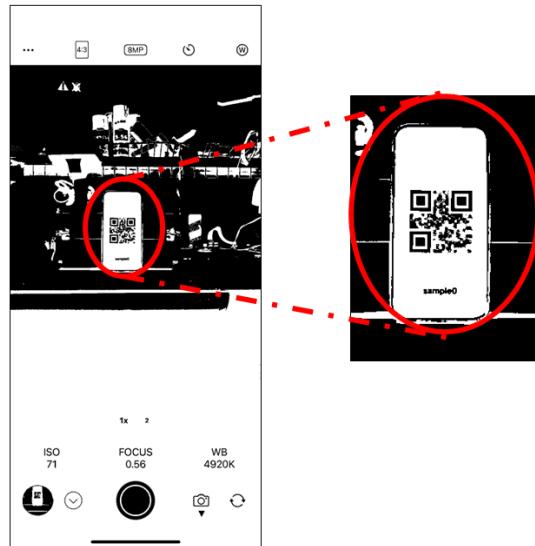


図 4.9: 膨張処理前の画像

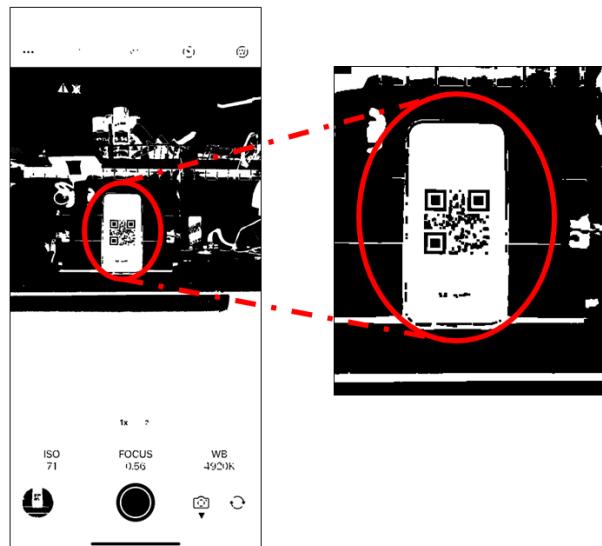


図 4.10: 膨張処理後の画像

また、一般に使用されている QR コードでは、同一サイズであっても撮影距離 100 cm から安定して検出可能であった。この事実と比較すると、本実験で構築したカラー QR コード検出システムは、検出可能距離の観点では既存の QR コード読み取り性能に大きく劣ることが明らかとなった。

しかしながら、カラー QR コードは従来の QR コードと比較して、理論上 3 倍の情報量を保持できるという特長を有している。そこで新たな評価指標として、

$$\text{検出可能距離} \times \text{QR コードの情報量}$$

を導入する。QR コードの情報量を n とすると、

$$\begin{aligned}\text{モノクロ QR コード : カラー QR コード} &= 100 \times n : 60 \times 3n \\ &= 5 : 9\end{aligned}$$

と表すことができる。本評価指標に基づけば、カラー QR コードはモノクロ QR コードと比較して 1.8 倍優れた情報伝達性能を有していると評価できる。

4.4 評価実験 2

カラー QR コードの利点として、格納する文字列の分割による QR コードの低解像度化が挙げられる(図 4.11)。同一文字列をエンコードした際の検出距離を比較することを目的として、評価実験 2 を行った。

ここで、一連の低解像度化処理について解説する。始めに、QR コードにする文字列を 3 つに分割する。次に、分割された文字列に対し、それぞれ RGB 単色 QR コードに変換する。これにより得られた 3 つの QR コードを重ね合わせることでカラー QR コードを生成する。デコード時には、RGB それぞれで得られた文字列を結合することで元の文字列を復元することが可能となる。処理前の文字列を QR コードに変換したときには、誤り訂正レベル M(Middle) で、バージョン 4(セル数 33×33) でエンコードされた(図 4.12)。一方で、3 つに分割された文字列を同一の誤り訂正レベル M(Middle) でエンコードした結果、バージョン 2(セル数 25×25) でのエンコードが可能となった(図 4.13, 4.14, 及び 4.15)。この時、QR コードへのエンコードには QR コード生成サイト³を使用した。

³https://www.cman.jp/QRcode/qr_make/

第 4 章

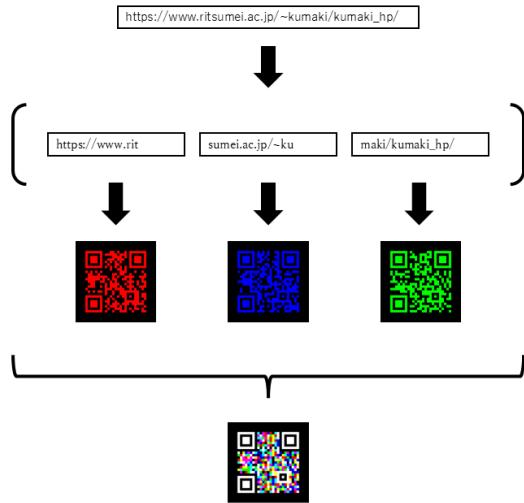


図 4.11: 文字列分割と QR コードの低解像度化



図 4.12: 低解像度化処理前 QR コードの仕様

第4章



図 4.13: 低解像度化処理後 QR コードの仕様 1



図 4.14: 低解像度化処理後 QR コードの仕様 2



図 4.15: 低解像度化処理後 QR コードの仕様 3

低解像度化処理前後の QR コードとカラー QR コードを比較したものが図 4.16 である。低解像度化処理により、QR コードを構成する一片のセル数が少なくなり、一辺が同一の長さの時に、解像度が低くなっていることが分かる。

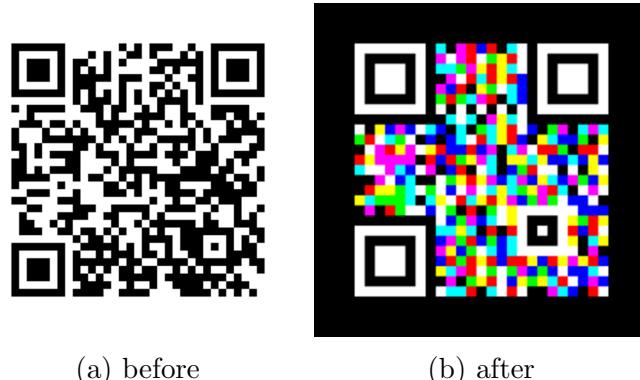


図 4.16: 低解像度化処理前後の比較

低解像度化処理前後の元画像に対して、距離 40 cm から 160 cm まで 20 cm おきに撮影を行った。得られた撮影データが図 4.17 及び図 4.18 である。実験環境は、4.1 節に準じた。

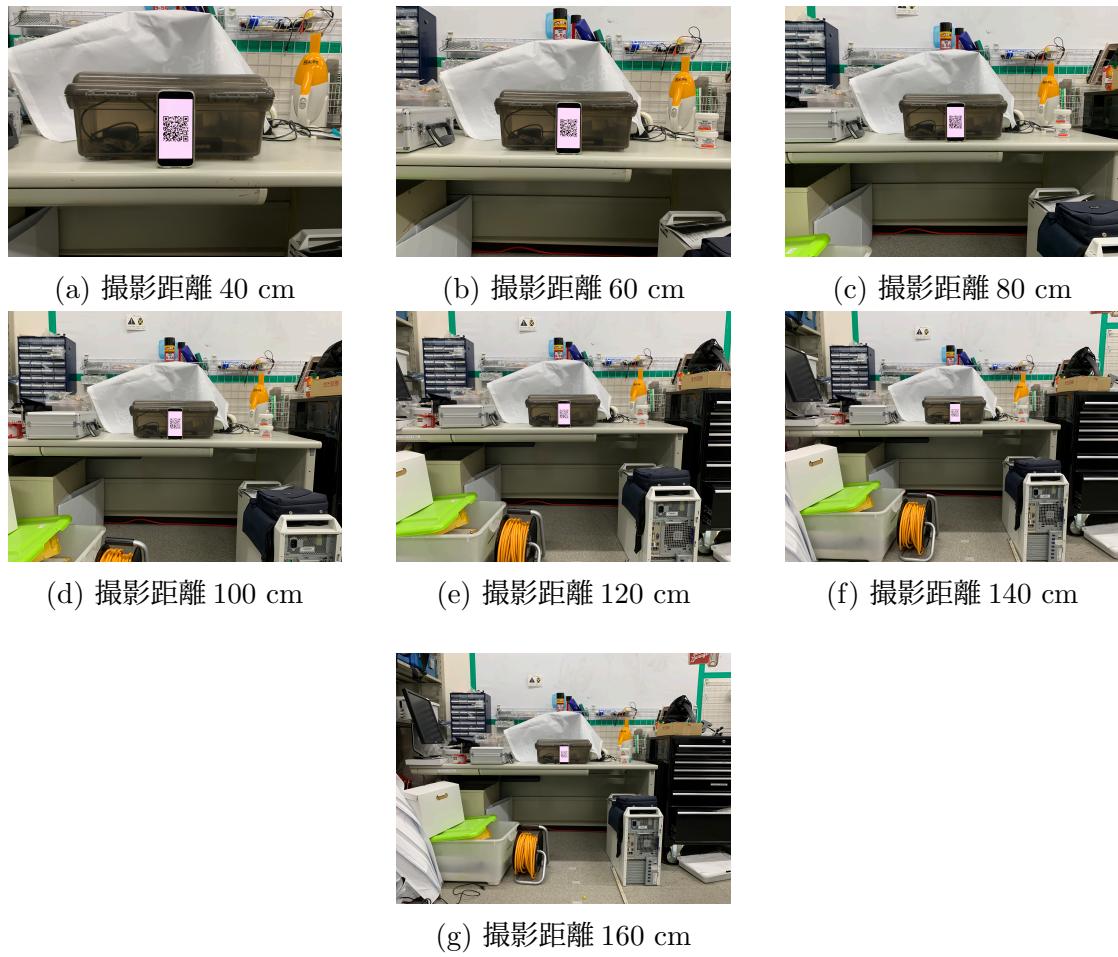


図 4.17: モノクロ QR コードの撮影データ

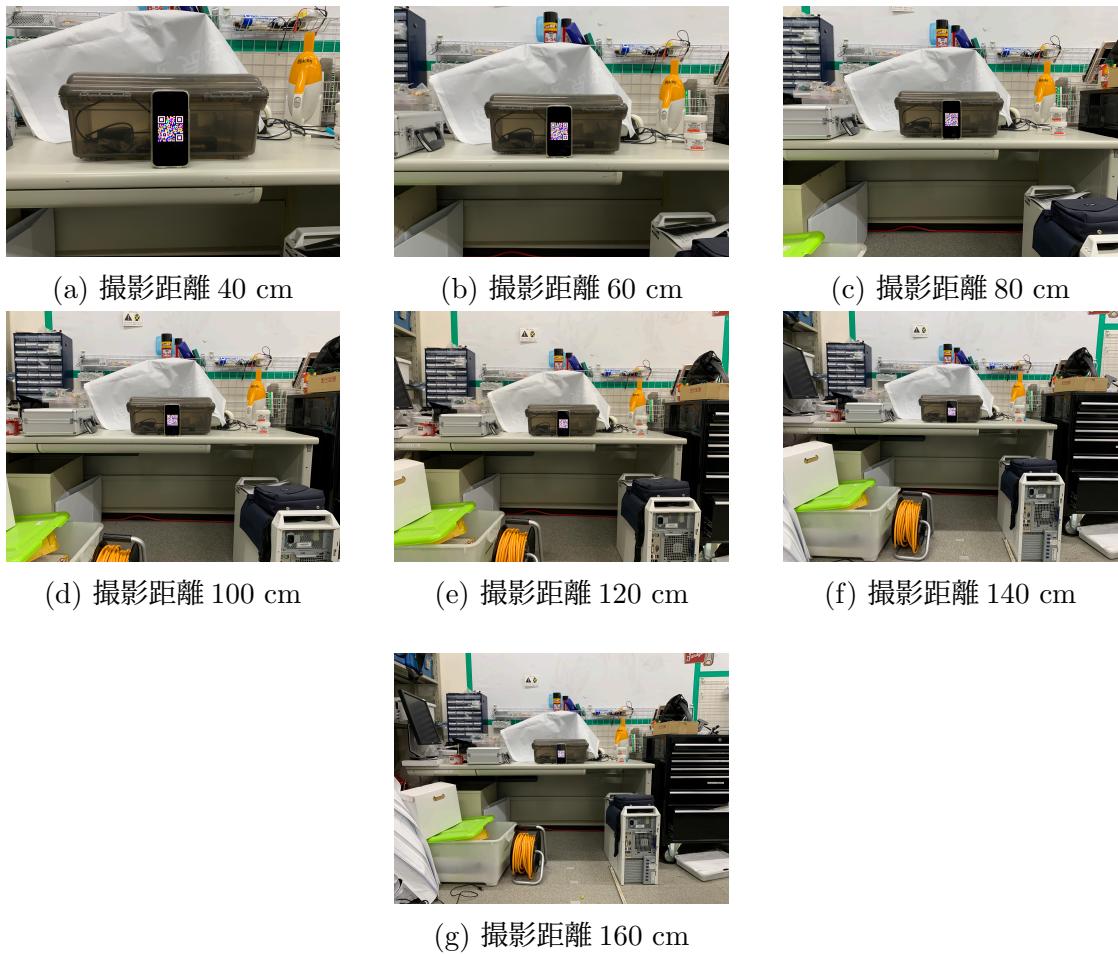


図 4.18: カラー QR コードの撮影データ

4.5 実験結果 2

検出結果をまとめたものが表 4.7である。ここで表 4.7中の 1 は検出可を、0 は検出不可を表している。

表 4.7: 低解像度化処理前後の検出可否

	40cm	60cm	80cm	100cm	120cm	140cm	160cm
Blue	1	1	0	0	0	0	0
Green	1	1	0	0	0	0	0
Red	1	1	0	0	0	0	0
mono	1	1	1	0	0	0	0

また、カーネルサイズ 2×2 でクロージング処理を適用後に、QR コード検出を

行った。検出結果をまとめたものが表??である。

表 4.8: 低解像度化処理前後のクロージング処理適用後の検出可否

	40cm	60cm	80cm	100cm	120cm	140cm	160cm
Blue	1	1	0	0	0	0	0
Green	1	1	0	0	0	0	0
Red	1	1	0	0	0	0	0
mono	1	1	1	0	0	0	0

4.6 考察 2

評価実験 2 の結果として、低解像度化処理後のカラー QR コードの方が検出精度で劣る結果となった。一方で、検出可否の差は 20 cm であり、今後のカメラ性能の進歩により、検出精度の逆転が期待できる。

第5章 カラーQRコードを用いたAIイラストの生成

本章では、イラストに見えるQRコード画像について触れ、その技術の根幹となるイラスト生成AIの原理について述べる。また、カラーQRコードを使用した類似画像の生成手法について検討を行った。

5.1 イラストに見えるQRコード

近年、イラスト生成AI技術が急速に発展している。FORTUNE BUSINESS INSIGHTSの生成AI市場分析 [20]によると、世界の生成AI市場規模は2023年に438億7,000万米ドルと評価されていると述べている。また、この市場規模は年々増加し、年平均成長率は39.6%にまでのぼると推定している(図5.1)。

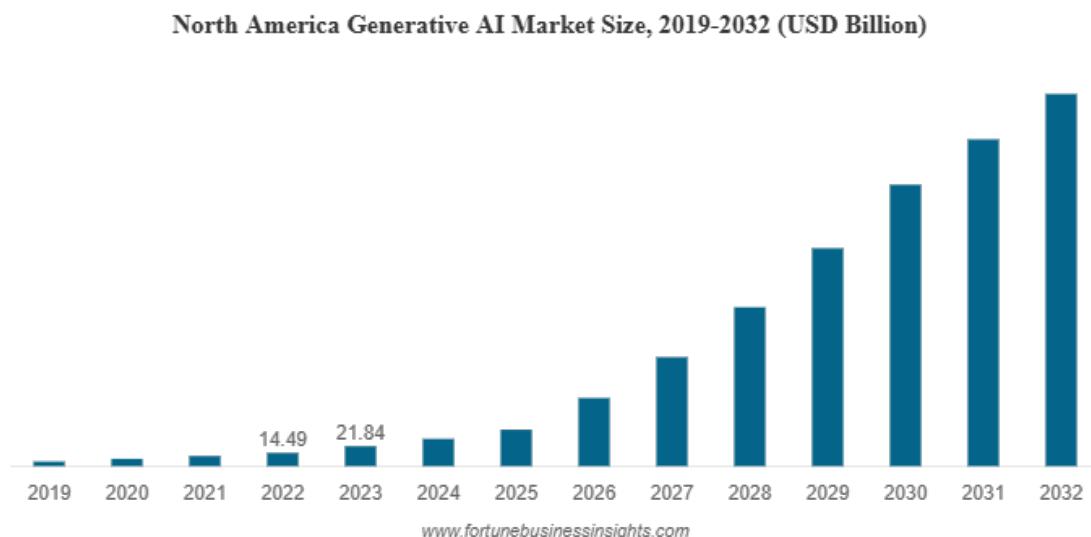


図5.1: 生成AIの市場規模予測

⁰Fortune Business Insights — 生成AI市場規模、シェア&業界分析、モデル別（生成官民ネットワークまたはGANSおよび変圧器ベースのモデル）、業界対アプリケーション、地域予測、2024-2032別—SSより引用

一方，このデータは生成 AI 全般を含めたものであり，イラスト生成 AI に限ったものではない。しかしながら，生成 AI の発展に伴い，イラスト生成 AI の技術進歩，また，社会への普及や，その市場規模も高まっていくと予測される。特にイラスト生成 AI の活用例として QR コードを入力画像として取り込むことで，イラストのように見えるが，実際に機能する二次元コードの生成が行われている。このような QR コードはアート QR コードと呼ばれている。その例が，図 5.2，及び 5.3 である。実際に QR コードリーダーでこれらの読み取りを行うと，それぞれ，(<https://qrbtf.com>) と，(https://note.com/st_ai) が得られる。

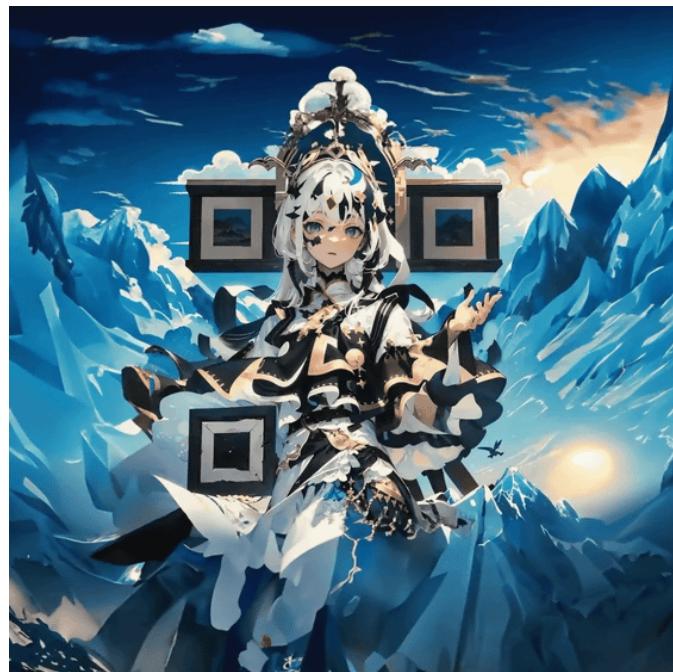


図 5.2: アート QR コードの例 1



図 5.3: アート QR コードの例 2

ここで, comfyUI を使用してアート QR コードを生成するための流れについて述べる。始めに, アート QR コードにするための元画像となる QR コードを用意する。次に QR コードのセルに対して調整を行い, QR コードセルの結びつきを弱める。最後に, イラスト生成 AI に対して入力画像として与える(図 5.4)。[21]によると, 特に, QR コードの調整処理が重要であるとしている。図 5.4 に記載のアート QR コードは, Anthony Fu's QR Toolkit¹を使用して, QR コードの調整を行った。Anthony Fu's QR Toolkit は web 上で公開されている QR コード生成サイトであり, 通常の QR コード生成に加え, 誤り訂正レベルの指定や, ピクセルスタイルの変更, 色の指定等を行うことができる(図 5.5)。また, アート QR コード生成時に使用したプロンプトを 5.1 に示す。

¹<https://qrcode.antfu.me/#verify>

第 5 章

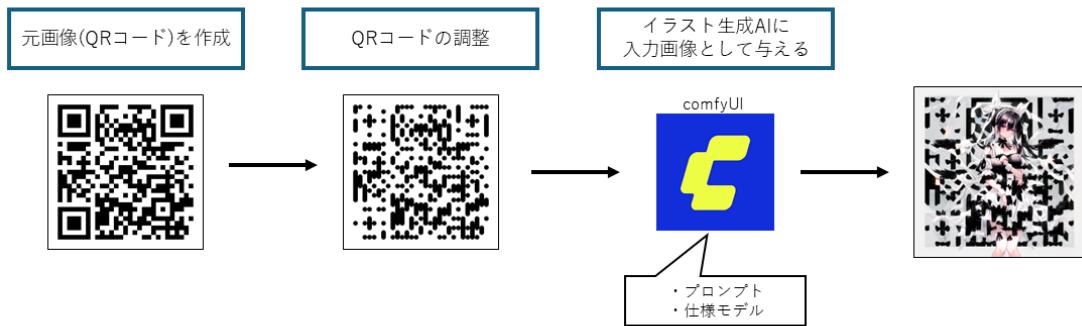


図 5.4: アート QR コード生成の流れ

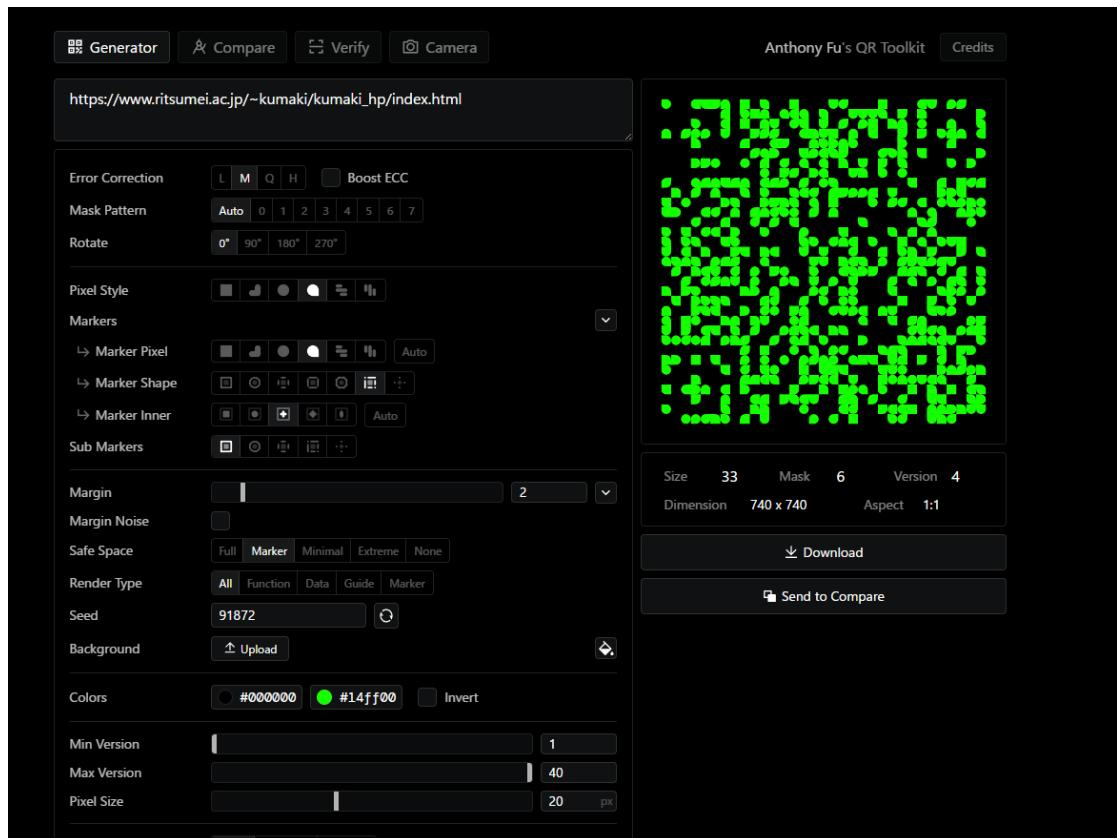


図 5.5: QRr コードの調整に使用した QR コード生成サイト

表 5.1: 使用したプロンプト

positive prompt	negative prompt
(1girl:1.3), solo, long_hair, breasts, looking_at_viewer, blush, black_hair, dress, bow, ribbon, closed_mouth, cleavage, bare_shoulders, medium_breasts, standing, purple_eyes, hair_ribbon, short_sleeves, frills, hairband, black_dress, wrist_cuffs, feet_out_of_frame, white_bow, white_ribbon, (black_ribbon:1.3)	embedding:EasyNegative, embedding:bad_prompt_version2-neg, embedding:verybadimagenegative_v1.3, (Multiple girls:1.3)

5.2 カラー QR コード入力によるアート QR コード生成の利点

現在のアート QR コード生成は、入力画像をモノクロの QR コードとするものにとどまっている。本節では、入力画像をカラー QR コードに拡張することを目標として得られる利点について述べる。

カラー QR コードに対応したカラーアート QR コード生成について 2 種類の方法が挙げられる。

- A. 3 種類の重ね合わせを行ったカラー QR コードを入力画像に使用する方法(図 5.6)
- B. 単色カラーの QR コードを入力画像として使用し、読み取りにカラー QR コード検出のシステムを使用する方法(図 5.7)

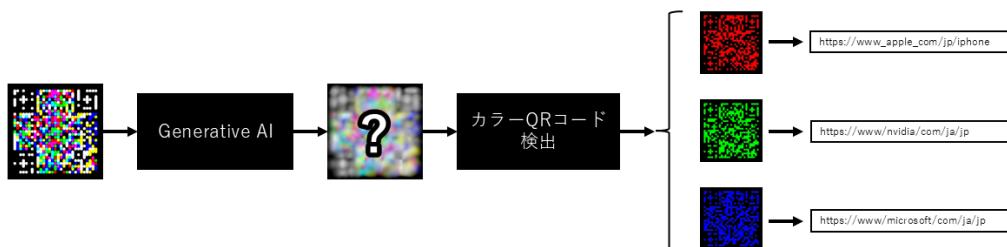


図 5.6: アート QR コード生成手法 A



図 5.7: アート QR コード生成手法 B

A の方法による利点として、情報量の増加が挙げられる。また、従来のアート QR コードと比較して、よりカラフルな画像の生成が行われると考えられる。

B の方法による利点として、よりイラストに近い形での画像生成が可能になることが挙げられる。例として、緑色単色 QR コードを使用して、カラーアート QR コードを生成する事を考える。この時、デコード時に緑色が抽出されることから、画素値でいう赤 (R) と青 (B) の値は任意の値をとれる。また閾値を使用して色の抽出を行う場合、QR コードの背景となる部分 (情報のないところ) では、赤 (R) と青 (B) の値は任意の値、緑 (G) は 128 以下の値で任意の値をとることができ (図 5.8)。

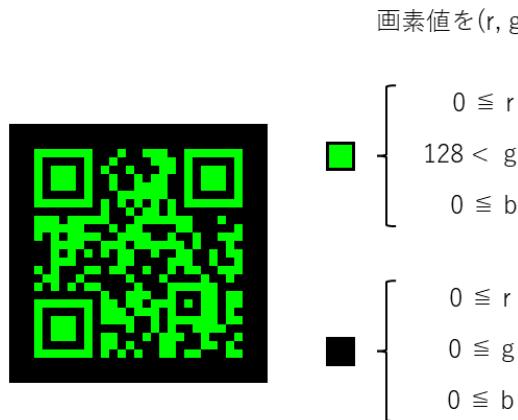


図 5.8: カラーアート QR コードの仕様の例

5.3 イラスト生成 AI の原理

代表的な生成モデルである GAN (敵対的生成ネットワーク) と Diffusion model (潜在拡散モデル) について述べる。

5.3.1 GAN

GANとは、Generative Adversarial Networkの頭文字である[22]。GANでは、生成モデル(Generator)と識別モデル(Discriminator)という2つのニューラルネットワークが互いに競いながら学習を行う構造をとる。生成モデルが実在する画像データに近い偽画像を生成し、一方で識別モデルは入力された画像が実が増加生成が増加を判別する役割を担う。

学習過程では、生成モデルは識別モデルを欺くような画像を生成しようとし、識別モデルはその判別精度を高めようとする。このような敵対的学习を繰り返すことで、より高品質な画像を生成することを目指すモデルである。GANによるイラスト生成の仕組みを表したもののが図5.9である。

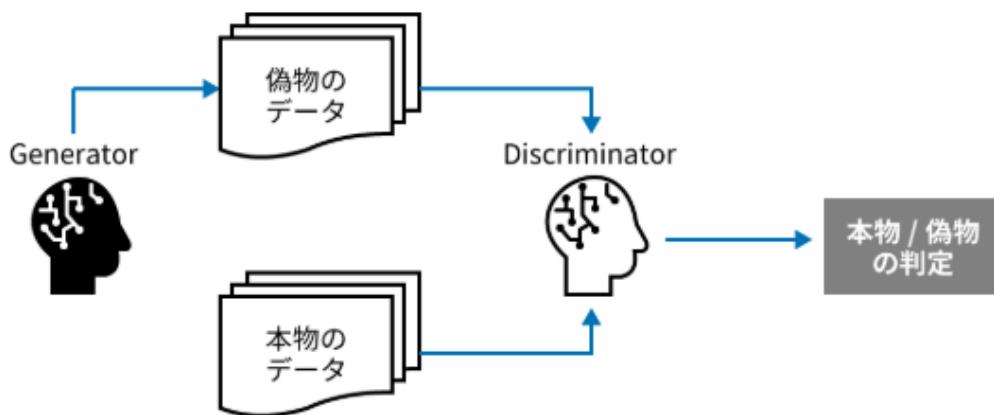


図5.9: GANによる生成のイメージ²

5.3.2 潜在拡散モデル

Diffusion(拡散モデル)は、近年の画像生成AIにおいて主流となっている生成モデルである[23]。拡散モデルは、画像に徐々にノイズを加えていく順拡散過程と、そのノイズを段階的に除去する逆拡散過程を学習することで、画像生成を実現する仕組みを特徴とする。学習段階では、実画像に対してランダムノイズを加え、そのノイズ成分を推定・除去する方法をモデルが学習する。

生成段階では、完全なノイズ画像を初期状態とし、学習済みモデルによってノイズを少しづつ取り除くことで、最終的に意味のある鮮明な画像を生成する。この過程は、ぼやけた画像に段階的に情報を付加し、徐々に明瞭な画像を完成させ

²Financial Engineering Group—敵対的生成ネットワーク
—https://www.feg.co.jp/analysis_tech/gan/より引用

る作業に例えられる。こうした逐次的かつ確率的な生成プロセスにより、拡散モデルは高い表現力と安定した学習特性を実現している。

また、GAN と比較して学習が安定しやすく、モード崩壊が起こりにくい点も拡散モデルの大きな利点である。この特性から、Stable Diffusion や DALL·E といった多くの先進的な画像生成 AI に採用されており、高品質かつ多様性のある画像生成が可能となっている。本研究で使用しているイラスト生成ツールである ComfyUI は、Stable Diffusion を基盤とした画像生成ツールである。ここで、Stable Diffusion は、潜在拡散モデルに基づく生成手法である。潜在拡散モデルによるイラスト生成の仕組みを表したもののが図 5.10 である。

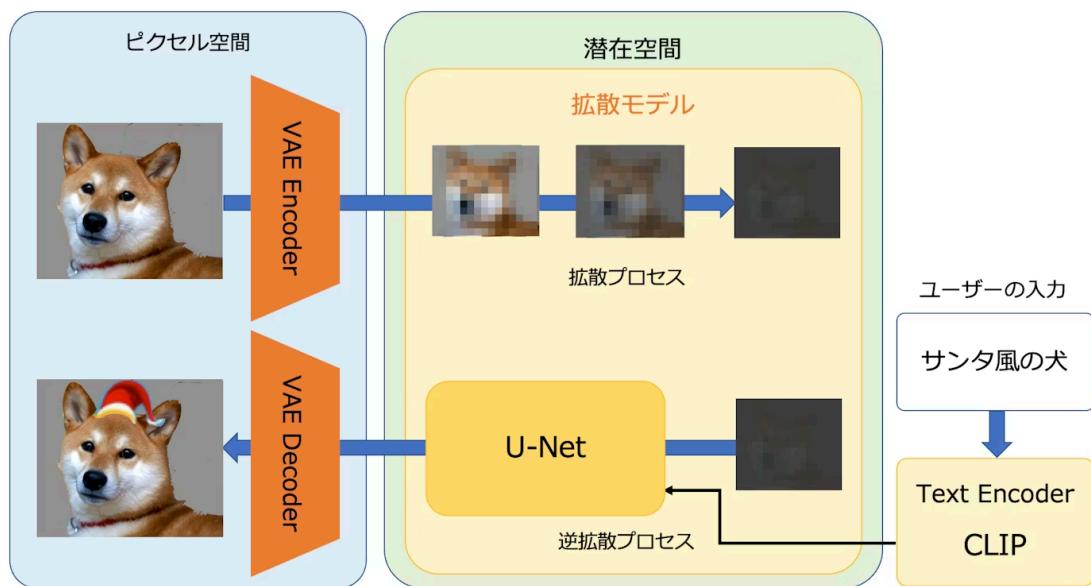


図 5.10: 潜在拡散モデルによる生成のイメージ³

5.4 使用したソフトとモデル

カラー QR コードを使用したイラスト生成を行うため、comfyUI⁴を使用した。ここで、comfyUI とは、イラスト生成 AI を独自にカスタマイズできるツールの一種である。本ツールでは、ノードと呼ばれる素子同士をつなぎ合わせることで、仕様モデルの選択や、モデルの強度の変更などの画像生成におけるカスタマイズをノーコードで行うことができる。本ツールの使用にあたって、一般的な QR コードをイラスト改変するワークフローが公開されていた web サイト [21] [24] を参考にした。comfyUI の操作画面が図 5.11 である。

³@ps010 (cyumizou) in Supership 株式会社—図で見てわかる！画像生成 AI 「Stable Diffusion」の仕組み <https://qiita.com/ps010/items/ea4e8ddef4de62d1ab1> より引用

⁴<https://www.comfy.org/>

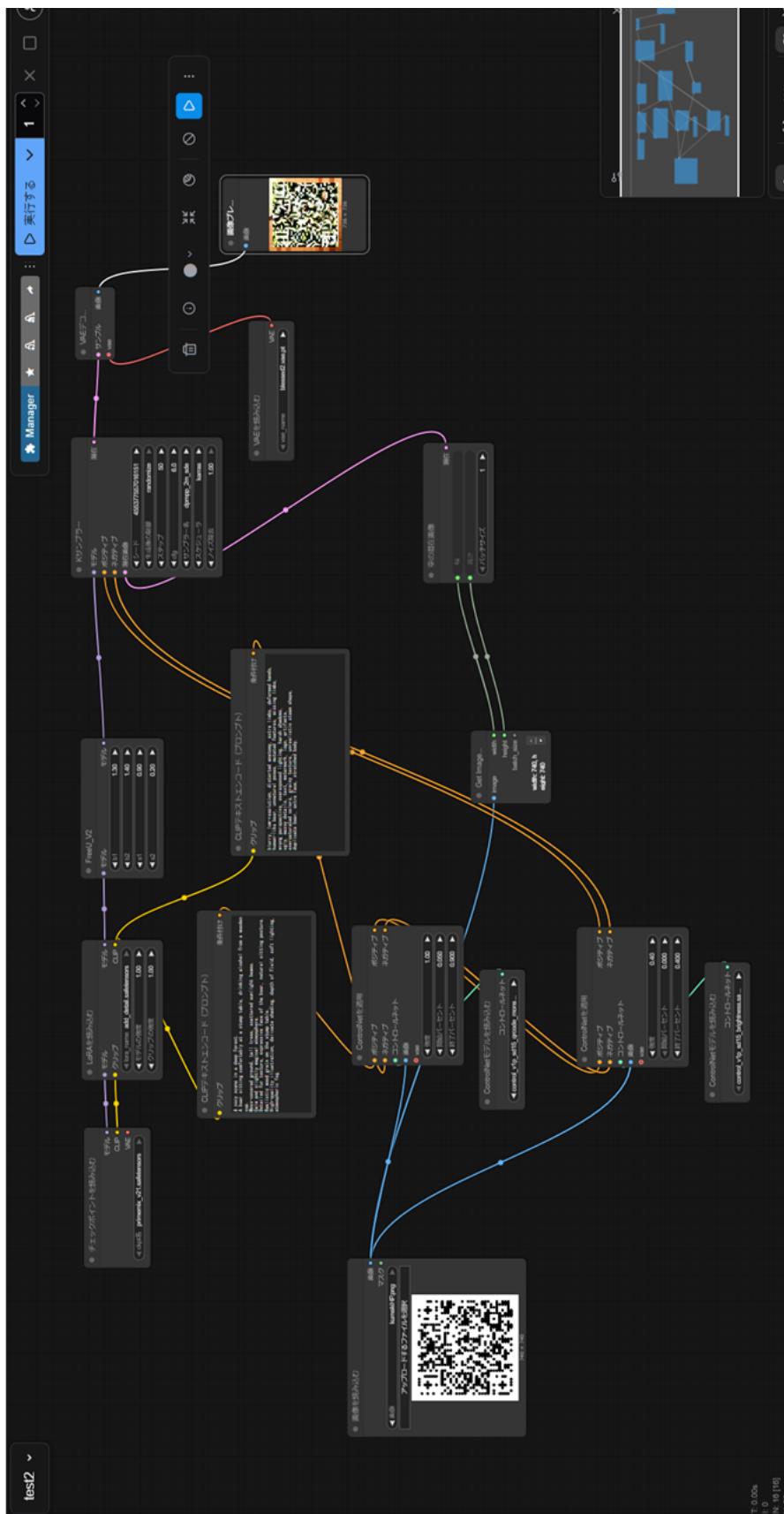


図 5.11: comfyUI の操作画面

ここで comfyUI で使用したノードについて述べる。

5.4.1 VAE (variational auto encoder)

VAE とは画像データの圧縮時の特徴を抽出する方法を決定しているモデルである。従って出力画像の品質に大きく影響を及ぼす。本実験では参考サイトのワークフローに習い、NoCrypt/blessed_vae を使用した。

5.4.2 チェックポイント (ckpt)

チェックポイントは出力画像の画風に影響を与える。Stable diffusion の学習過程で作成された画像の特徴を保存したファイルである。そのため、他のモデルに対して数 GB と大きな容量をもつファイルとなる。本実験では参考サイトのワークフローに習い、primemix_v21 を使用した。

5.4.3 controlnet

画像生成の構図や形状を自在にコントロールできる拡張機能となる。画像生成の過程に割り込むことで、出力画像に大きく影響を与える。QR コードを用いたイラスト改変技術に大きく関わるノードである。本実験で使用した controlnet モデルについては 5.5 節のとおりである。

5.4.4 K サンプラー

出力画像の仕上がりに影響を与える。無数にあるノイズの中から少しづつ画像を作っていく工程を担当するノードである。シード値の変更や、ステップ数の変更が可能である。

5.4.5 LoRA

Low-Rank-Adaptation の頭文字であり、少ないリソースで効率的に学習ができる手法である。画風の調整や、人物やキャラクターの指定など、多岐にわたる調整を可能とするようなモデルが複数存在する。ただし、生成過程に割り込む controlnet に比べて、出力画像に与える影響は比較的少ないとされる。

5.5 実験内容

本実験の目的は、従来、モノクロのQRコードを入力画像として作成するアートQRコードの生成に対して、入力画像にカラーQRコードを使用し、QRコードの可読性がある生成AIイラストを得ることである。従って、従来のアートQRコードのワークフローをベースとして、使用するcontrolnetモデルを追加する改変を加えた。

本実験で使用したcontrolnetモデルを以下に示す。

- monster-labs/control_v1p_sd15_qrcode_monster (以下、qrcode_monster)
- latentcat/control_v1p_sd15_brightness (以下、brightness)
- TencentARC/T2Iadapter_color_sd14v1 (以下、T2Iadapter_color)

従来のワークフローではqrcode_monsterとbrightnessの二つを使用していた。しかし、入力画像をカラーQRコードとする場合には、入力画像の色の位置を出力画像に反映する必要がある。従って、T2Iadapter_colorを新しく採用した。

生成には、各controlnetの強度を変更するパラメータとした。実験の内容が以下の2つである。

- 各controlnetを単体で使用し、強度を変えて生成を行う
- 3つのcontrolnetを併用し、強度を変えて生成を行う

1つ目の実験では、強度を、0.5, 1.0, 1.5と変更して生成を行った。

2つ目の実験では、controlnetの強度に対して、(brightness, T2Iadapter_color, qr_monster) = (0.3, 0.9, 0.3)を基準として、それぞれパラメータを変えて生成を行った。このパラメータを基準として設定した理由は2つある。1つ目は、入力画像が持つ色の情報を出力画像に強く反映させるためである。従って、T2Iadapter_colorの強度を高く設定している。2つ目は、controlnet同士の干渉を防ぐためである。controlnetの強度を極端に高い値に設定すると、モデル同士の干渉が発生してしまい、狙った生成結果が得られないケースが存在する。従って、使用するcontrolnetの強度の合計が1.5となるように基準を設定した。

5.6 実験結果

5.6.1 各controlnetによる出力画像への影響

はじめに、cotrolnetを単体で使用したときの出力結果に与える影響を比較した。ポジティブプロンプト、ネガティブプロンプトへの入力を共に空白("")として生成を行った。入力画像として使用した画像が図5.12である。

latentcat/control_v1p_sd15_brightnessを使用して画像生成を行った結果が図5.13である。次に、monster-labs/control_v1p_sd15_qrcode_monsterを使用した画像生成を行った。本モデルには、新旧2つのバージョンが存在したため、それぞれのバ-

ジョンを用いた生成を行った。生成の結果が図 5.14, 及び 5.15である。さらに, TencentARC/t2iadapter_color_sd14v1 を使用した画像生成を行った。生成の結果が図 5.16である。

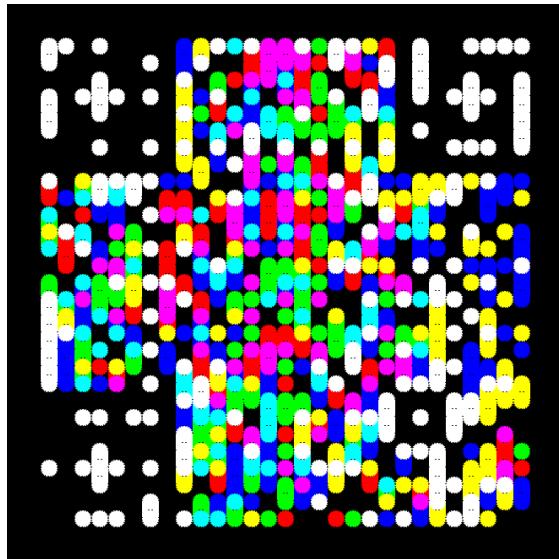


図 5.12: 画像生成に使用した入力画像

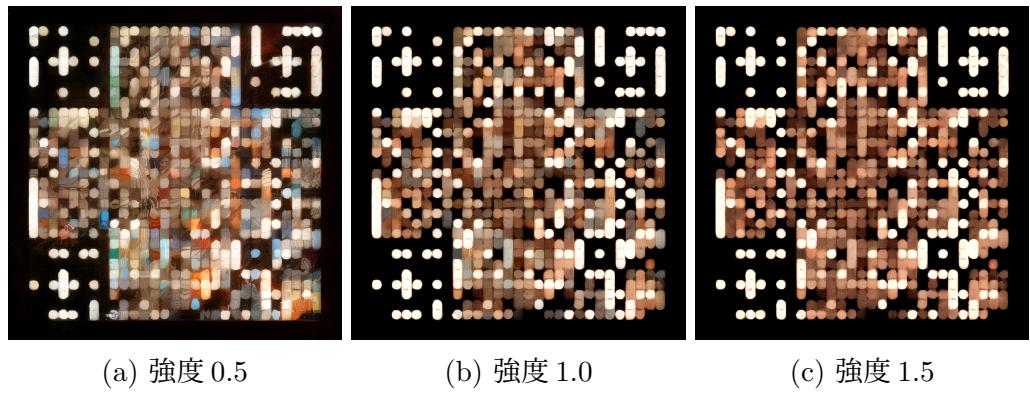


図 5.13: brightness の強度による比較



(a) 強度 0.5

(b) 強度 1.0

(c) 強度 1.5

図 5.14: qrcode_monster_v1 の強度による比較



(a) 強度 0.5

(b) 強度 1.0

(c) 強度 1.5

図 5.15: qrcode_monster_v2 の強度による比較



(a) 強度 0.5

(b) 強度 1.0

(c) 強度 1.5

図 5.16: T2Iadapter_color の強度による比較

5.6.2 3種類の controlnet を使用した画像生成

画像生成の結果が図 5.17, 及び 5.17である。出力結果として、入力画像に対する色の再現度が低く、今回実験したパラメータでは可読性のあるカラーアート QR コードを生成することはできなかった。



図 5.17: 3種類の controlnet を使用した生成結果 (1)

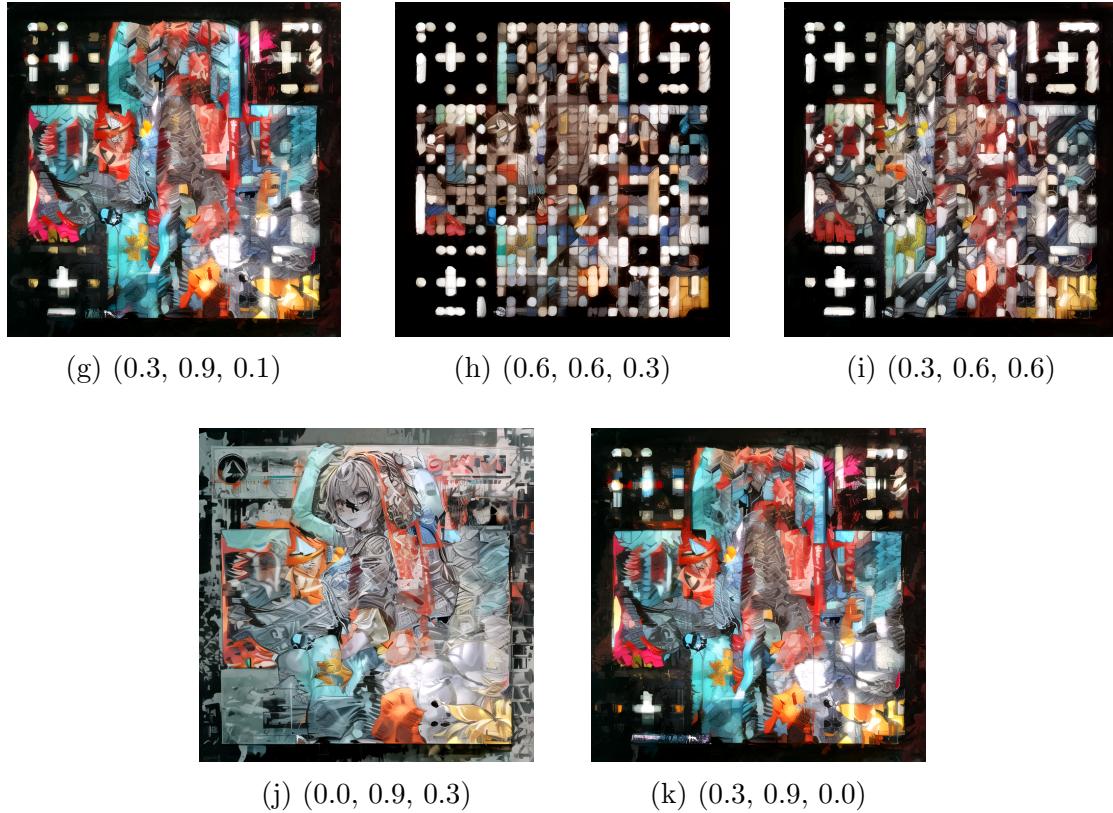


図 5.17: 3 種類の controlnet を使用した生成結果 (2)

5.7 考察

本実験では、プロンプトを空白として画像生成を行ったが、アニメ風のキャラクターのような出力画像が得られた。これは、生成に使用したチェックポイントの影響によるものと考えられる。生成に使用したチェックポイントである primemix_v21 は、人物表現に優れたモデルであり、学習に使用されたアニメイラストの影響により実験のような結果が得られたと考えられる。また、図 5.13 の結果から、brightness は入力画像の構造を色濃く出力に影響させるモデルであることが分かった。更に、TencentARC/t2iadapter_color_sd14v1 は入力画像に対する出力への影響が比較的少なく、生成画像から QR コードが取得できる色の再現は見られなかった。

3 種類の controlnet を使用した実験に関して、図 5.17、及び 5.17 の (f), (j) にみられるように、brightness の値が低いと、入力画像の構造が反映されず、ファインダパターン領域が消失される事が確認できた。また、(a), (b), (c) では、比較的同様の生成結果が得られた。

第6章 結論

本章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる

6.1 まとめ

本研究を通じて、RGB を重ね合わせる事によってエンコードされるカラー QR コードの実装と、近距離からの撮影によるデコードが可能となるシステムを構築することができた。また、カラー QR コードを入力画像としたアート QR コードの生成に関して、今回の実験で扱った画像生成手法では、開発した読み取りシステムでデコード可能な画像の生成はできなかった。

6.2 今後の展望

6.2.1 カラー QR コードの読み取りシステムについて

本研究の評価実験より、撮影距離が中長距離になるにつれて、カラー QR コードの検出率が著しく低下するという課題が明らかとなった。この要因として、撮影距離の増加に伴い、撮影画像中における QR コード領域が相対的に小さくなり、モジュール（セル）サイズが縮小することが挙げられる。しかし本研究では、撮影距離に関わらず同一のカーネルサイズを用いてモルフォロジー処理を適用していたため、遠距離撮影画像に対しては過度な処理となり、セル形状の崩れや色情報の劣化を招いていたと考えられる。

第2章で述べたステゴパネル V を用いた RGB マイクロ QR コードの研究においても、撮影距離に応じて適切なカーネルサイズや処理回数が存在することが示されており、本研究の結果はこの知見と整合している。すなわち、「距離に応じた画像処理パラメータの最適化」がカラー QR コード検出において重要な要素であることが示唆される。

この課題に対する有効な展望として、物体検出アルゴリズムを用いた QR コード領域の事前推定が挙げられる。まず、撮影画像から YOLO をはじめとする物体検出 AI により QR コード領域を推定・切り出し、その領域をリサイズや射影補正によって正規化した補正画像を生成する。その後、補正後画像に対してモルフォ

ロジー処理や色抽出処理を適用することで、撮影距離に依存しない安定した前処理が可能になると考えられる(図6.1).

この手法により、QRコード領域に対する処理スケールを実質的に一定に保つことができ、遠距離撮影時におけるセル劣化や色干渉の影響を大きく軽減できると期待される。また、本提案手法はカラーQRコードに限らず、一般のモノクロQRコードに対しても検出率向上に寄与する汎用的な前処理技術となり得る。

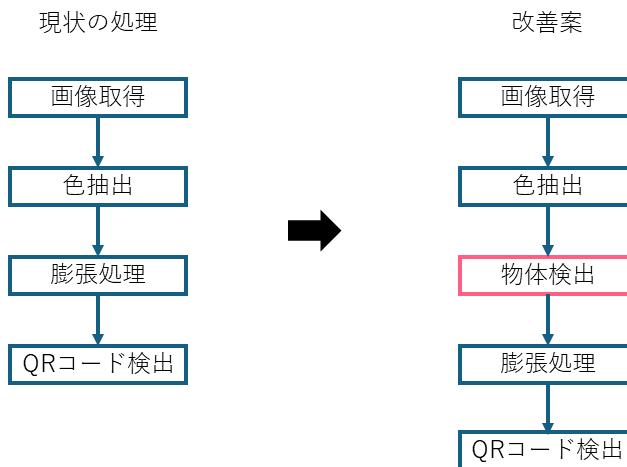


図6.1: カラーQRコードの検出率を向上させる改善案

6.2.2 カラーQRコード入力によるアートQRコードの生成について

第5章の実験において、既存のControlNetモデルを用いた画像生成では、本研究で開発したカラーQRコード読み取りシステムによって安定して検出可能な「カラーアートQRコード画像」を生成することはできなかった。これは、既存のControlNetモデルが、一般画像の構造保持や輪郭保持を目的として学習されており、QRコードのような「厳密なセル構造」や「色の二値性」を保持することを想定していないことが主な要因であると考えられる。

実験結果より、ControlNetの強度を上げることでQRコード形状は保持されるがイラスト性が失われ、逆に強度を下下げるとイラスト性は向上するがQRコードとしての可読性が失われるというトレードオフの関係が確認された。この結果は、「QRコードの構造的制約」と「生成AIによる自然画像生成」の間に本質的なギャップが存在することを示している。

この課題に対する展望として、QRコード専用のControlNetモデルの独自開発が挙げられる。現在インターネット上で公開されているControlNetモデルの多くはsafetensors形式のバイナリファイルであり、内部構造の解析や改変は現実的ではない。そのため、カラーQRコードのセル構造、色分布特性、および誤り訂正

第6章

特性を学習データとして用いた、専用のControlNetの学習が必要になると考えられる。

関連図書

- [1] 原 昌宏, 渡部 隆之, “2次元コードおよびその読み取り方法.” 特許第 2938338 号, 1999. 株式会社デンソー.
- [2] “デンソーウェーブ — QR コード開発 — テクノロジー.”
<https://www.denso-wave.com/ja/technology/vol1.html>.
- [3] “総務省令和4年版情報通信白書.” <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja>
- [4] “デンソーウェーブ — 技術情報 —QR コード®とは.”
<https://www.denso-wave.com/ja/adcd/fundamental/2dcode/qrc/index.html>.
- [5] “コードドットコム — qr コードの情報量とバージョン.”
<https://www.qrcode.com/about/version.html>.
- [6] “Keyence — qr コードのしくみ.” <https://www.keyence.co.jp/ss/products/autoid/codereader/>
- [7] 嶋田拓也, 下村優太郎, 桐原瑠也, 熊木武志, “フリッカパターンを用いた動画向け情報埋め込み手法の実装と評価,” 信学技報, vol. 119, no.2, pp. 117–122, 2020.
- [8] Y.Shimomura, T.Shimada, R.Kirihara, and T.Kumaki, “Live demonstration: Development of dot matrix LED using flicker noise as a base,” IEEE International Symposium on Circuits And Systems (ISCAS), May 2020.
- [9] R.Kirihara, Y.Shimomura, T.Shimada and . T.Kumaki, “Live demonstration: Development of LED-based stego-panel for new smartphone usage,” IEEE International Symposium on Circuits And Systems (ISCAS), 2020.
- [10] T.Shimada, and T.Kumaki, “Development of flicker-noise-based lighting communication method,” RISP International workshop on Nonlinear Circuit, 2020.
- [11] T.Shimada, and T.Kumaki, “A study of led-based spy-photo prevention system using flicker noise for actual environment,” International Technical Conference on Circuits/Systems, 2018.

付録

- [12] 下村優太郎, 嶋田 拓也, 熊木武志, “フリッカノイズによるドットマトリクス LED への実装,” LSI とシステムのワークショップ, no. no.4.
- [13] “GarageFarm.NET—残像現象（Persistence of Vision）について.”
<https://garagefarm.net/jp-blog/persistence-of-vision-explained-what-is-pers>
- [14] 山下智紀, “肉眼では視認不可な情報表示照明装置ステゴパネルの機能拡張とその応用,” vol. 立命館大学大学修士論文, 2025.
- [15] 寺田健二, “2 次元カラーコード実現を目指した画像中の色認識,” vol. 三重大学修士論文, 2011.
- [16] H. Blasinski, O. Bulan, and G. Sharma, “Per-colorant-channel color barcodes for mobile applications: An interference cancellation framework,” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 22, no. 4, pp. 1498–1511, 2013.
- [17] N. Taveerad and S. Vongpradhip, “Development of color qr code for increasing capacity,” pp. 645–648, 2015.
- [18] “RGB と CMYKってなに? 意味や変換方法など基本を徹底解説!.”
<https://www.profuture.co.jp/mk/column/what-is-rgb>.
- [19] “色の三属性「色相」「明度」「彩度」とは? 【HSB/HSV】.”
<https://321web.link/color-attribute/>.
- [20] “Fortune business insights.” <https://www.fortunebusinessinsights.com/jp/>
- [21] “イラストにしかみえない qr コードを作ってみる.”
https://note.com/st_ai/n/ne8908b9f8901.
- [22] “Rakuten mobile — 画像生成 ai の仕組みとは? 初心者向けに解説.”
<https://business.mobile.rakuten.co.jp/column/2025/0701-01/>.
- [23] “@ps010(cyumizou) in supership 株式会社 — 図で見てわかる! 画像生成 ai 「stable diffusion」の仕組み.” <https://qiita.com/ps010/items/ea4e8ddeff4de62d1ab1>.
- [24] “Qr code — comfy ui workflow — openart.”
https://openart.ai/workflows/jackal_thirsty_43/qr-code/uy1ivgb1x0v7Cc2TN3lP.

付録

カラーQRコードにエンコードするプログラム

tricolor_make_mixedQR.py

```
1 import cv2
2 import numpy as np
3 from tkinter import Tk, Label, Button, filedialog
4 from tkinterdnd2 import TkinterDnD, DND_FILES
5 import qrcode
6
7
8 # コードを作成QR
9 qr = qrcode.QRCode(
10     version=1,    # サイズのバージョン
11     error_correction=qrcode.constants.ERROR_CORRECT_H,    # エラー訂正レベル
12     box_size=15,   # 各ボックスのサイズ
13     border=10,    # ボーダーのサイズ
14 )
15 # qr.add_data(data)
16 qr.make(fit=True)
17
18 # 画像を生成
19 img = qr.make_image(fill='black', back_color='white')
20
21 # 画像を保存
22 img.save("chinese2.png")
23
24 class ImageProcessor:
25     def __init__(self):
26         self.images = []
27         self.labels = ["Red", "Blue", "Green"]
28         self.current_label_index = 0
29
30     def load_image(self, file_path):
31         image = cv2.imread(file_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
32         if image is None:
33             print(f"Failed to load image: {file_path}")
34             return None
35         return image
36
37     def process_image(self, image, color):
38         processed_image = np.zeros((image.shape[0], image.shape[1], 3), dtype=np.uint8)
39         processed_image[image == 0] = color # Set black pixels to the specified color
40         processed_image[image == 255] = [0, 0, 0] # Set white pixels to black
41         return processed_image
42
43     def add_image(self, file_path):
44         color_map = {
45             0: ([0, 0, 255], "qr_red_loaded.png"),
46             1: ([255, 0, 0], "qr_blue_loaded.png"),
47             2: ([0, 255, 0], "qr_green_loaded.png")
48         }
49
50         image = self.load_image(file_path)
51         if image is not None:
52             color, filename = color_map[self.current_label_index]
53             processed_image = self.process_image(image, color)
54             cv2.imwrite(filename, processed_image)
55             self.images.append(processed_image)
56             self.current_label_index += 1
57
58         if len(self.images) == 3:
59             self.combine_images()
60
61     def combine_images(self):
62         if len(self.images) == 3:
63             mixed_image = cv2.add(cv2.add(self.images[0], self.images[1]), self.images[2])
64             resized_image = cv2.resize(mixed_image, (288, 288))
65             #image_mixed = "./Desktop/tricolor_panel/image1/mixedQR1.png"
```

付録

```
66         cv2.imwrite("image_mixed.png", resized_image)
67         print("Processed - and - saved - the - mixed - image - as - image_mixed.png")
68     else:
69         print("Error : - Not - enough - images - to - combine .")
70
71 def select_file(image_processor):
72     file_path = filedialog.askopenfilename()
73     #file_path = "./Desktop/tricolor_panel/"
74     if file_path:
75         image_processor.add_image(file_path)
76
77 def main():
78     image_processor = ImageProcessor()
79
80     root = Tk()
81     root.title("Image - Processor")
82
83     label_text = f"Please - load - the - {image_processor.labels[image_processor.current_label_index]} - image"
84     label = Label(root, text=label_text)
85     label.pack(padx=10, pady=10)
86
87     def update_label():
88         nonlocal label_text
89         if image_processor.current_label_index < len(image_processor.labels):
90             label_text = f"Please - load - the - {image_processor.labels[image_processor.current_label_index]} - image"
91             label.config(text=label_text)
92         else:
93             label.config(text="Processing - complete .")
94
95     def load_next_image():
96         select_file(image_processor)
97         update_label()
98
99     button = Button(root, text="Load - Image", command=load_next_image)
100    button.pack(padx=10, pady=10)
101
102    root.mainloop()
103
104 if __name__ == "__main__":
105     main()
```

カラー QR コードの読み取りプログラム

app.py

```
1 from flask import Flask, request, jsonify, render_template, url_for, redirect
2 import sqlite3
3 import os
4 import cv2
5 from pyzbar.pyzbar import decode
6 from datetime import datetime
7 from PIL import Image
8 import base64
9 import io
10 import numpy as np
11
12 app = Flask(__name__)
13 app.config['UPLOAD_FOLDER'] = 'static/images'
14 DB_PATH = 'db.sqlite3'
15
16 # データベースの初期化SQLite
17 def init_db():
18     conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
19     c = conn.cursor()
20     c.execute('''
21         CREATE TABLE IF NOT EXISTS images (
22             id INTEGER PRIMARY KEY,
23             filename TEXT NOT NULL,
24             created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP
25         )
26     ''')
27     conn.commit()
28     conn.close()
29
30 # # 画像を保存する関数
31 # def save_image(image_data):
32 #     # で送ってきた画像データをデコードして保存Base64
```

付録

```
33 #     image_data = image_data.split(",") [1]
34 #     image = Image.open(io.BytesIO(base64.b64decode(image_data)))
35 #     filename = f"{datetime.now().strftime('%Y%m%d%H%M%S')}.png"
36 #     image_path = os.path.join(app.config['UPLOAD_FOLDER'], filename)
37 #     image.save(image_path)
38
39 #     # データベースに保存
40 #     conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
41 #     c = conn.cursor()
42 #     c.execute('INSERT INTO images (filename) VALUES (?)', (filename,))
43 #     conn.commit()
44 #     conn.close()
45
46 #     return image_path
47
48 def save_image_formdata(image):
49     # リクエストの中にPOST 'image' ファイルが含まれているかを確認
50     if 'image' not in request.files:
51         return jsonify({"status": "error", "message": "画像ファイルがありません"}), 400
52
53     image_file = request.files['image']
54
55     # 撮影日時を取得してファイル名を設定
56     timestamp = datetime.now().strftime('%Y%m%d%H%M%S') # 例: "20241021213045"
57     filename = f"{timestamp}.png"
58     file_path = os.path.join(app.config['UPLOAD_FOLDER'], filename)
59
60     # 画像ファイルを保存
61     image_file.save(file_path)
62
63     return file_path
64
65
66     # 色抽出と画像の保存
67     def extract_color_and_save_HSV(image_path, color_index):
68         image = cv2.imread(image_path)
69         color = hsv_extract_to_mono(image, color_index)
70         color_filename = f"{datetime.now().strftime('%Y%m%d%H%M%S')}-[red,green,blue][{color_index}].png"
71         color_path = os.path.join(app.config['UPLOAD_FOLDER'], color_filename)
72         cv2.imwrite(color_path, color)
73
74     return color_path
75
76     # 色の抽出を=====空間で行う=====
77     def hsv_extract_to_mono(image, i):
78
79         # jsonify({'status': 'error', 'message': 'まで実行125'})
80
81         # からに変換BGRHSV
82         hsv_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2HSV)
83
84         # 赤要素の抽出
85         if i == 0:
86             # 白色範囲
87             lower_white = np.array([0, 0, 100])
88             upper_white = np.array([180, 60, 255])
89
90             # 赤色範囲(～の範囲で設定)0180
91             lower_red1 = np.array([0, 80, 100])
92             upper_red1 = np.array([15, 255, 255])
93             lower_red2 = np.array([165, 80, 100])
94             upper_red2 = np.array([180, 255, 255])
95
96             # 黄色範囲
97             lower_yellow = np.array([15, 80, 100])
98             upper_yellow = np.array([45, 255, 255])
99
100            # マゼンタ範囲
101            lower_magenta = np.array([135, 80, 100])
102            upper_magenta = np.array([165, 255, 255])
103
104            # 各色のマスクを作成
105            mask_white = cv2.inRange(hsv_image, lower_white, upper_white)
106            mask_red1 = cv2.inRange(hsv_image, lower_red1, upper_red1)
107            mask_red2 = cv2.inRange(hsv_image, lower_red2, upper_red2)
108            mask_yellow = cv2.inRange(hsv_image, lower_yellow, upper_yellow)
109            mask_magenta = cv2.inRange(hsv_image, lower_magenta, upper_magenta)
110
111            # 赤色の2つのマスクを結合
112            mask_red = cv2.bitwise_or(mask_red1, mask_red2)
113
114            # 白、赤、黄、マゼンタのマスクを結合して黒にする領域を指定
115            mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_white, mask_red)
116            mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_yellow)
117            mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_magenta)
118
119            # すべての領域を白に塗りつぶし
120            result = np.ones_like(image) * 255
121
```

付録

```
122     # マスクで指定された領域を黒に変換
123     result [mask_to_black > 0] = [0, 0, 0]
124
125     return result
126
127
128     # 緑要素の抽出
129     elif i == 1:
130         # 白色範囲
131         lower_white = np.array([0, 0, 100])
132         upper_white = np.array([180, 60, 255])
133
134         # 緑色範囲 (~の範囲で設定) 018060
135         lower_green = np.array([45, 80, 100])
136         upper_green = np.array([75, 255, 255])
137
138         # 黄色範囲
139         lower_yellow = np.array([15, 80, 100])
140         upper_yellow = np.array([45, 255, 255])
141
142         # シアン範囲
143         lower_magenta = np.array([85, 80, 100])
144         upper_magenta = np.array([105, 255, 255])
145
146         # 各色のマスクを作成
147         mask_white = cv2.inRange(hsv_image, lower_white, upper_white)
148         mask_green = cv2.inRange(hsv_image, lower_green, upper_green)
149         mask_yellow = cv2.inRange(hsv_image, lower_yellow, upper_yellow)
150         mask_magenta = cv2.inRange(hsv_image, lower_magenta, upper_magenta)
151
152         # 緑色のつのマスクを結合2
153         # mask_red = cv2.bitwise_or(mask_red1, mask_red2)
154
155         # マスクを結合して黒にする領域を指定
156         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_white, mask_green)
157         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_yellow)
158         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_magenta)
159
160         # すべての領域を白に塗りつぶし
161         result = np.ones_like(image) * 255
162
163         # マスクで指定された領域を黒に変換
164         result [mask_to_black > 0] = [0, 0, 0]
165
166         return result
167
168
169     # 青要素の抽出
170     elif i == 2:
171         # 白色範囲
172         lower_white = np.array([0, 0, 100])
173         upper_white = np.array([180, 60, 255])
174
175         # 青色範囲 (~の範囲で設定) 0180120
176         lower_blue = np.array([105, 80, 100])
177         upper_blue = np.array([135, 255, 255])
178
179         # シアン色範囲
180         lower_yellow = np.array([75, 80, 100])
181         upper_yellow = np.array([105, 255, 255])
182
183         # マゼンタ範囲300
184         lower_magenta = np.array([135, 80, 100])
185         upper_magenta = np.array([165, 255, 255])
186
187         # 各色のマスクを作成
188         mask_white = cv2.inRange(hsv_image, lower_white, upper_white)
189         mask_blue = cv2.inRange(hsv_image, lower_blue, upper_blue)
190         mask_yellow = cv2.inRange(hsv_image, lower_yellow, upper_yellow)
191         mask_magenta = cv2.inRange(hsv_image, lower_magenta, upper_magenta)
192
193         # 青色のつのマスクを結合2
194         # mask_red = cv2.bitwise_or(mask_red1, mask_red2)
195
196         # マスクを結合して黒にする領域を指定
197         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_white, mask_blue)
198         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_yellow)
199         mask_to_black = cv2.bitwise_or(mask_to_black, mask_magenta)
200
201         # すべての領域を白に塗りつぶし
202         result = np.ones_like(image) * 255
203
204         # マスクで指定された領域を黒に変換
205         result [mask_to_black > 0] = [0, 0, 0]
206
207         return result
208
209
210     # =====
211
212     # (膨張) 处理の後に(収縮) 处理を行う関数 DilationErosion
```

付録

```
213 def apply_dilation_then_erosion(image_path):
214     image = cv2.imread(image_path, 0) # 画像をグレースケールで読み込み
215     kernel = np.ones((5, 5), np.uint8) # カーネルサイズは調整可能です
216
217     # 処理 Dilation
218     dilated_image = cv2.dilate(image, kernel, iterations=1)
219
220     # 処理 Erosion
221     processed_image = cv2.erode(dilated_image, kernel, iterations=1)
222
223     # 処理後の画像を保存
224     processed_filename = f'{datetime.now().strftime("%Y%mf%d%H%M%S")}-processed.png'
225     processed_path = os.path.join(app.config['UPLOAD_FOLDER'], processed_filename)
226     cv2.imwrite(processed_path, processed_image)
227
228     return processed_path
229
230 # コードを検出する関数QR
231 def detect_qr_code(image_path):
232     image = cv2.imread(image_path)
233     decoded_objects = decode(image)
234     qr_codes = [obj.data.decode('utf-8') for obj in decoded_objects]
235     return qr_codes
236
237 @app.route('/')
238 def index():
239     return render_template('index_phone1106.html')
240
241
242 @app.route('/capture', methods=['POST'])
243 def capture():
244     if 'image' not in request.files:
245         return jsonify({"status": "error", "message": "画像ファイルが見つかりません"}), 400
246
247     color = request.form.get('color')
248     image = request.files['image']
249     # color_choice = data.get('color') # 'red', 'green', or 'blue'
250     color_index = {'red': 0, 'green': 1, 'blue': 2}[color]
251
252     image_path = save_image_formdata(image)
253     # mono_image_path = hsv_extract_to_mono(image_path, color_index)
254     mono_image_path = extract_color_and_save_HSV(image_path, color_index)
255
256     # と処理を実行 DilationErosion
257     processed_image_path = apply_dilation_then_erosion(mono_image_path)
258
259     qr_codes = detect_qr_code(processed_image_path)
260
261
262     if qr_codes:
263         return jsonify({'status': 'success', 'qr_code': qr_codes[0]})
264     else:
265         return jsonify({'status': 'error', 'message': 'コードが検出されませんでした。QR'})
266
267
268 if __name__ == '__main__':
269     # 証明書と秘密鍵のパスを指定
270     context = ('server.crt', 'server.key')
271     # でサーバーを起動 HTTPS
272     app.run(host='0.0.0.0', port=5000, ssl_context=context)
```


謝辞

本論文の作成にあたり、貴重な助言、ご指導をして頂いた立命館大学理工学部電子情報工学科 熊木 武志教授に深く感謝の意を表します。また、本研究に関わりご助言をして頂いた石田勝之介氏に深く感謝致します。最後に、日頃から様々な事においてお世話になりました7期生を始めとするマルチメディア集積回路システム研究室の皆様に最大の感謝をお贈り致します。

2026年3月 池田 新

研究業績リスト

【国内研究会等発表】

- 池田新, 熊木武志, ”RGB カラー QR コードの読み取り実験とその評価について,”
ソサイエティ大会 2024, Sep., 2024.

【国外研究会等発表】

- Arata Ikeda, Takumi Hayashi, and Takeshi Kumaki, ”Development of secure QR code by using invisible information display lighting device,” ITC-CSCC 2024, Jul., 2024
- Arata Ikeda, Tomoki Yamashita, and Takeshi Kumaki, ”Development of RGB micro QR code system using invisible information lighting device 'Stego-panel V',” NOLTA 2025, Oct., 2025

【その他研究活動】

- EdgeTech+ West 2024, Jul., 2024
- EdgeTech+ 2024, Nov., 2024
- EdgeTech+ West 2025, Jul., 2025
- EdgeTech+ 2025, Nov., 2025

【受賞】