

QR コードへの画像埋め込み領域の拡大

Expansion of the Displayable Area in Design QR Code
Based on Image Processing

飯塚 大貴 † 多田 雄一 ‡ 森井 昌克 ‡

Hiroyuki Iizuka Yuichi Tada Masakatu Morii

1 はじめに

近年、携帯電話やスマートフォンといった携帯情報端末の普及に伴い、これらの機器で読み取り可能な QR コード [1] が雑誌や新聞などに多数掲載されている。この QR コードには Web サイトの URL などの情報を格納することができる。通常の文字情報として Web サイトのアドレスを記載した場合は、ユーザは手作業でアドレスを入力する必要があり、ユーザ自身の負担が大きくなってしまふ。一方情報が QR コードに格納され記載されていた場合は機器を用いて読み取ることができ、容易に Web サイトへのアクセスなどが可能となる。

QR コードは二次元コードの一種である。バーコードのような一方向にのみ情報を持つ一次元コードに対し、二次元コードは縦横二方向に情報を有するため格納できる情報量が飛躍的に向上する。そのため QR コードは URL などのテキストデータだけでなく画像や音声などの大容量のデータを格納することが可能であり、様々な用途に応用することができる。さらに QR コードは格納される情報に符号化という処理を行うことにより、誤り訂正能力を有している。そのため QR コードの印字面に汚れやかすれが発生した場合でも、符号化された情報の復号処理を行うことで正しい情報を復元することができる。

一方で QR コードは白黒のドットによる幾何学模様で構成されるため視認性に乏しく、格納されている情報をひと目で把握することが困難であるという課題もある。そのため QR コードに対してイラストや写真などを付加して視認性を向上させた QR コードが提案されている。提案されている視認性を向上させた QR コードは大きく分けて二つの方法が存在する。一つ目は QR コードの誤り訂正能力を利用して、イラストや写真などを QR コード上に誤りとして貼り付け、読み取り時の復号処理によって正しい情報を復元する方法である。この方法で埋め込みが可能な最大の画像の大きさは、QR コードの訂正能力の最大値である QR コード全体の約 30% となる。二つ目は格納した情報と最大容量との差分の余剰領域を利用して、符号化の際にデザインを付与する方法である。この方法では、理論的には誤りを発生させること無

く QR コードにデザインを付加することが可能である。このため、理論上では QR コード全体の約 85% までの大きさの画像を埋め込むことが可能である。しかしながら、携帯電話などを利用した実際の読み取り環境下では画像埋め込み部分で多くの誤りが発生するため、理論値通りの大きさの画像を埋め込むことは困難である。この傾向は写真などの高精細なデザインを施した QR コードにおいて特に顕著となる。

本研究では二つ目の方法を実際の読み取り環境下に適用した場合の QR コード全体に占める画像埋め込み可能な領域の評価を行う。さらにその際に有効な QR コードやアルゴリズムの各パラメータについても考察を行う。これにより実際の読み取り環境下における非組織符号化を用いて画像埋め込みを行なった QR コードの実用性を示す。

2 QR コード

QR コード (Quick Response Code) とは二次元コードの 1 つであり、従来の一次元バーコードに対して大きなデータ容量を持ち、格納情報を符号化することで誤り訂正能力を有するという特徴を持つ。QR コードは開発された当初は製造や配送といった分野での仕様が想定されていた [2] が、現在は当初の分野に留まらない幅広い用途で活用されている。特に、近年の情報化社会の発展によって携帯電話やスマートフォンといった携帯情報端末の普及が進んでおり、これらの機器での読み取りを想定して雑誌や広告等に QR コードが記載される例も非常に多い。本章では、QR コードの用語および構成の説明と、QR コードの訂正能力に利用されている RS(Reed-Solomon) 符号 [3] に関して示す。

2.1 QR コードの用語

以下に QR コードにおける用語の説明を行う。

1. 型番 (バージョン)

QR コード全体の大きさを示し、1 から 40 までの値で設定される。型番が大きくなると格納できる情報量も大きくなる。

2. 誤り訂正レベル

QR コードは汚損が生じてモジュールの明暗が正しく読み取れなかった場合も、誤りを訂正して正しく読み取りを行うことができる。これを誤り訂正能力と呼び、L, M, Q, H の 4 段階から設定できる。それぞれ QR コードの情報量に対して約 7%, 15%

† 神戸大学工学部, Faculty of Engineering, Kobe University

‡ 神戸大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering Kobe University

%, 25%, 30%までの誤りを訂正することができる。同一の型番では訂正レベルの高いものほど格納できる情報量は少なくなる。

3. モジュール

QR コードを構成する最小のブロックを示す。1 モジュール当たり明暗いずれかの状態を示しており、これは 1 ビットの情報に相当する。型番 n の QR コードでは、一辺のモジュール数は $17 + 4 \times n$ という式で定められる。

4. データコード語

QR コードでは情報はコード語という単位で扱われる。1 つのコード語は 8 つのモジュールから成り 8 ビットの情報を持つ、これは RS 符号におけるシンボルに相当する。データコード語とは、QR コードに格納する情報が収められるコード語であり、RS 符号における情報点に相当する。データコード語の大きさは型番と訂正レベルによって一意に決まる。

5. 埋め草コード語

QR コードに格納する情報がデータコード語数に満たない場合、余った空のコード語は一定のパターンの情報で埋められる。これを埋め草コード語と呼ぶ。埋め草コードは単に容量を埋めるために用いられ、有意な情報は持たない。

6. 誤り訂正コード語

RS 符号の検査点に相当する情報が収められたコード語を示す。データコード語から一意に決定される。符号理論の検査点に相当する。

7. 符号化領域

RS 符号によって符号化された符号語が記される領域を示す。データコード語と誤り訂正コード語がこの領域に収められる。QR コードでは 1 つの符号語を RS ブロックと呼ぶ。5-L までは単一の RS ブロックが利用され、それ以上では複数の RS ブロックが用いられる。

8. 機能パターン

紙面などに印字された QR コードを光学的に読み込む際に必要な情報が記される領域である。QR コードの位置検出や画像の歪み補正に用いられる。この領域は符号化が行われていないため、大きく破損した場合には QR コードの読み取りが困難となる。

2.2 RS 符号

QR コードの格納情報を符号化する際に用いられる訂正符号の一種である。訂正符号とは、本来の情報に冗長な情報を付与することで符号語を生成する方法である。これにより符号語の一部が誤った場合でも、その誤りを検出し訂正することが可能となる。ここで、符号語の中の本来的な情報を情報点、追加した冗長な情報を検査点と呼び、それぞれデータコード語と誤り訂正コード語に相当する。符号語の長さが n 、情報点が k 個、最小距離が d の符号を符号 (n, k, d) と呼ぶ。

QR コードの仕様では RS 符号は組織符号化が行われる。これは、符号語の前半に情報点を配置し、後半に検



図1 QRコードにおける符号語の構成

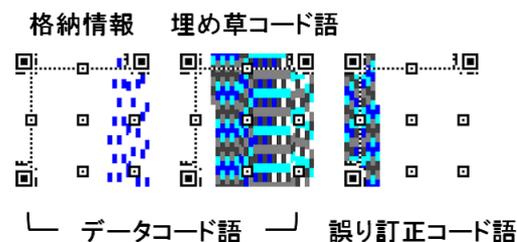


図2 10-LのQRコードシンボルの構成

査点を配置するものである。QRコードにおける符号語の構成を図1に示す。

2.3 QRコードの構成

QRコードシンボルは大きく分けて2つの領域で構成されており、それぞれ機能パターンと符号化領域と呼ばれる。符号化領域は更にデータコード語と埋め草コード語、誤り訂正コード語に分けられる。型番10、誤り訂正レベルLのQRコードにおけるそれぞれの配置を図2に示す。

符号化領域において、符号語は右下から順番に右詰めで配置される。このため、データコード語は右側に、埋め草コードは中央付近に、誤り訂正コード語が左側にそれぞれ位置する。

また、QRコードでは型番5、訂正レベルLまでは1つの符号語に情報が収められるが、それ以降は複数本の符号語に情報を分割して格納される。このため、複数の符号語を持つQRコードではインターリーブ配置という方法が取られる。これは、各符号語をコード語単位に分割し、各符号語のコード語を先頭から順に交互に配置していくというものである。

3 QRコードへのデザイン付加に関する研究例

QRコードにデザインを加えることによって視認性を向上させる研究は現在までに広く行われている。QRコードへデザインを付加する方法は、大きく2つに分けることができる。1つ目は誤り訂正能力を利用して画像をQRコード表面に貼り付ける方式である。2つ目は埋め草コード語を利用してQRコード自体にデザインを埋め込む方式である。また2つ目の方法は通常の組織符号化を行う方式と、組織符号化を用いる場合の欠点を改良した非組織符号化を用いる方式の2つに分けられる。本



図 3 デザイン QR(文献 [4] より引用)



図 4 ロゴ Q(文献 [5] より引用)



図 5 QR-JAM(文献 [6] より引用)



図 6 文献 [7] の手法

章では両方式の概要を説明すると共に、それぞれの方式を用いた既存研究について示す。

3.1 誤り訂正能力を利用した方式

誤り訂正能力を利用した方式では QR コードの持つ誤り訂正能力を利用してデザインの付加を行う。QR コードに格納された情報は RS 符号による符号化が行われているため、訂正能力以内の情報の破損であればそれを訂正して正しい情報を復元することが出来る。このため QR コードに汚れなどが生じた場合にも、訂正能力の範囲で正しく読み取ることが可能である。

この方式は上記の QR コードの特徴を利用し、写真やイラストなどのデザインを完成した QR コード上に直接貼り付けるものである。この方式では、機能パターンを除いた QR コード上の任意の領域にデザインを施すことが可能である。そのため原理が単純であるため作成が容易であり、QR コード上の任意の領域に自由なデザインを施せるなどの利点が挙げられる。一方で、誤り訂正レベルは最大の H で固定されるため格納データ容量が小さくなり、またデザイン領域を大きくするほど訂正能力に余地が無くなり汚れなどの破損に弱くなるといった欠点がある。また、この方式において埋め込みを行うことの出来る画像の最大の大きさは、QR コードの訂正能力の最大値から約 30% 程度となる。

この方式を用いた研究例としてデザイン QR[4]、ロゴ Q[5] が挙げられる。ロゴ Q ではデザインを単純に貼り付けるのではなく、一部に本来のモジュール情報を目立たないように残すことで訂正能力の使用を最低限に抑える工夫がなされている。図 3 にデザイン QR、図 4 にロゴ Q の手法を用いたデザインを付加した QR コードの例をそれぞれ示す。

3.2 埋め草コード語領域を利用した方式

埋め草コード語領域を利用した方式では、QR コードを構成する上で行う RS 符号での符号化時に埋め草コード語を任意に設定することでデザインの付加を実現する。QR コードを構成する白黒のドット模様は内部に格納された符号語の情報に対応している。このため、符号語を適当に設定することで QR コード自体にドット絵のような形でデザインを埋め込むことが可能である。この際、符号後の情報点の中にある埋め草コード語の領域をデザインに用いることで、符号語に格納された有意な情

報に影響を与えることなくデザインを付加することが可能になる。この方式の利点として、誤り訂正能力に依存すること無くデザインの付加を実現できる点が挙げられる。一方で、QR コードの仕様では符号化は組織符号化によって行われるため埋め草コード語の位置も固定されてしまい、QR コードのどの部分にデザインを施すか自由に選択することができない欠点がある。この方式を用いた研究例として QR-JAM[6]、文献 [7] の手法が挙げられる。

QR-JAM については、この方式を使ってデザインを付加した QR コードを作成できるフリーソフトの QR-JAM MAKER が公開されている。ただし、作成できるのは格納する情報量にかかわらず型式 5-L の QR コードに限定されている。これは、型式が 5-L 以上の QR コードでは複数の符号語がインターリーブされて配置されて配置され大きくまとまったデザイン可能領域を確保できなくなる問題があるためだと考えられる。

文献 [7] の手法では複数の RS 符号がインターリーブ配置される問題が解決されており、1 モジュールをさらに 4 つのサブモジュールに分割することで解像度の向上を実現している。図 5 に QR-JAM、図 6 に文献 [7] の手法を用いてデザインを付加した QR コードの例をそれぞれ示す。

3.3 非組織符号化を用いた方式

非組織符号化を用いた方式 [8] では QR コードの格納情報を RS 符号によって符号化する際に非組織符号化を用いることでデザインの自由度を向上させている。この方式では、QR コード中の任意の領域に埋め草コード語を利用したデザイン付加が可能になる。デザインを施すことが出来る領域が最大となるのは誤り訂正レベルが L で情報点が全て埋め草コード語となる時であり、理論上は QR コードの面積の約 85% までデザインが可能である。

3.3.1 非組織符号化

非組織符号化とは符号化方法の一つである。組織符号化では、符号長 n ビットの符号語の前半に情報点部が k ビット配置され、後半に検査点部が $(n - k)$ ビット配置される。一方で、非組織符号化では符号長 n ビットの符号語において任意の k 箇所に情報点を配置し、残った $(n - k)$ 個の箇所に検査点を配置する。非組織符号化を用

いることで符号生成に nC_k の自由度を与えることが出来る。このため組織符号化を行う場合位置が固定されていた埋め草コード語領域をより自由な位置に配置し、デザインに利用することが可能になる。

また、ある符号化方式で生成される全てのパターンの符号語の集まりを符号語空間と呼ぶ RS 符号において非組織符号化によって生成した符号語は組織符号化による符号語空間の中に含まれることが知られている。すなわち、非組織符号化によって生成した符号語は、適当な情報を組織符号化して得られる符号語と一致する。このため非組織符号化によって生成した符号語も既存の QR コードデコーダによって問題なく復号することが可能である。

さらに非組織符号化を実現する方法の一つとして、RS 符号 [3] の MDS 性を利用する方法があげられる。MDS 性とは符号 (n, k, d) が同一最小距離を有する符号の中で最小の検査記号数を持つ最大距離分離符号 (Maximum Distance Separable Code) であることを意味しており、 $d = n - k + 1$ の関係式が成立する。この性質を利用する事で RS 符号の非組織符号化が可能となる。

この方法で非組織符号化を行うにあたり、符号語 C とパリティ検査行列 H の関係式 $HC^t = 0$ を利用する。QR コードの符号化には $GF(2^8)$ の有限体を用いた短縮 RS 符号が利用される。短縮されている箇所は 255 行ある検査行列 H の前半 255 - n 行で、後半の n 行を利用している。

符号 (n, k, d) の k 個の情報点部 $s_1 s_2 s_3 \dots s_k$ から残りの $n - k$ 個の検査点部 $p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-k}$ を MDS 性を利用した非組織符号化により導出する方法を以下に示す。

- step1 符号 (n, k, d) の n シンボルから k シンボル分を任意に選択する。
- step2 検査行列 H の n 行の内、選択された k シンボルに相当する行を行・列変形により対角化する。
- step3 $\alpha^n + \alpha^m = 0$ の関係式を利用し、 $p_n = \sum_{l=1}^k a_{ln} \times s_l$ の計算を行う。ここで a_{ij} とは検査行列 H の i 行 j 列目の要素を指し、 i 行の内に対角化されていない k 行の集合が l である。

以上の操作によって RS 符号 (n, k, d) から任意に選択された k 個のコード語をデータコード語とみなし、選択されていない残りの $n - k$ 個のコード語を誤り訂正コード語とする RS 符号語を生成できる。これにより QR コードを構成する各 RS ブロックの埋め草コード語に相当する部分を QR コード中の任意の場所に配置することができ、デザインの自由度が大きく向上する。

3.4 デザイン用の画像への置き換え

埋め草コード語を用いたデザインの埋め込みは QR コードの誤り訂正能力を使用しないという利点を持つ。一方で、そのデザインはモジュールの配置や明暗状態を操作して施されるため、高精細な画像を埋め込むことが困難であるという欠点が存在した。これを解決する方法として、埋め草コード語をデザインした上から高精細な

画像を貼り付ける方法が提案されている。これは、QR コードデコーダによって読み取りを行う際に、画像の部分のモジュールの明暗がどの様にデコーダに判断されるかを利用し、画像を貼り付ける箇所のモジュールの元々の明暗をそれと一致するよう操作するものである。この方法では、論理的には誤り訂正能力を使用すること無く高精細な画像を QR コードに埋め込むことが可能となる。

4 画像埋め込み QR コードの実環境への適用

3.3 節に示した非組織符号化を利用した画像埋め込み方式では、QR コード作成時にデザインを付加することによって誤りが発生することはない。このため、理論上は格納情報を除いた情報点部分、すなわち埋め草コード語となる部分をすべてデザイン領域として使用することが可能である。この時の画像埋め込み領域の大きさは QR コード全体の約 85% となる。しかし、紙面に印刷した QR コードを携帯電話等で読み取るような実際の環境下においては、画像埋め込み部分で多くの誤りが発生し読み取りが不可能となる場合が多数存在する。これは QR コードデコーダでモジュール情報の明暗を判定する際、QR コードの作成時に意図した通りにモジュールの明暗が判定されないことが原因と考えられる。本章では、このような実際の読み取り環境下における QR コードの評価を行い、非組織符号化を用いた方法で QR コードに埋め込むことが可能な画像の最大の大きさを求める。この際、誤り訂正能力を用いて画像埋め込みを行なった QR コードについても同様に評価を行う。

4.1 評価方法

4.1.1 評価対象の QR コードの生成

評価対象となる QR コードに埋め込む画像として、3 種のロゴマーク及び 2 種の人物写真を用いた。ロゴマークをそれぞれロゴ a,b,c とし、人物写真を人物 a,b とした。これらの画像を元に埋め込みを行う部分のモジュールの明暗を操作し、その上に元画像の貼り付けを行う事で評価対象の QR コードを生成した。作成する QR コードの型番は 10 とし、訂正レベルは非組織符号化を用いるものでは L、誤り訂正能力を用いる場合は H を用いた。また、格納情報として神戸大学の URL (<http://www.kobe-u.ac.jp/>) を用いた。

4.1.2 読み取り環境

埋め込み画像の大きさを変化させながら上記の生成法に従い QR コードを作成し読み取りを行った。読み取り用の機器としてスマートフォンを用い、以下の 3 種の QR コード読み取り用アプリケーションを使用した。

- QR Droid ver.5.1[9],
- Qr Barcode Scanner ver.1.4[10],
- QR コードリーダー-EQS ver.4.4.7[11],

評価対象の QR コードについてそれぞれのアプリケーションで読み取りを行い、すべてのアプリケーションで正しく読み取りが行えた場合に「読み取り可能」、1 つで

表 1 各画像の埋め込み可能な最大の大きさ

	ロゴ a	ロゴ b	ロゴ c	人物 a	人物 b
誤り訂正能力	27%	27%	28%	26%	30%
非組織符号化	31%	27%	43%	28%	36%



図 7 誤り訂正能力によるロゴ a の最大埋め込みサイズ



図 8 非組織符号化によるロゴ a の最大埋め込みサイズ



図 9 誤り訂正能力によるロゴ b の最大埋め込みサイズ



図 10 非組織符号化によるロゴ b の最大埋め込みサイズ



図 11 誤り訂正能力によるロゴ c の最大埋め込みサイズ



図 12 非組織符号化によるロゴ c の最大埋め込みサイズ

も不可能だった場合には「読み取り不可」とした。

評価対象の QR コードはインクジェットプリンター [12] によって普通紙にカラー印刷を行い、埋め込みを行う画像サイズを少しずつ大きくしながら上記の方法での読み取り結果をまとめた。

ここで、埋め込みを行う画像サイズの初期値を決定するために PC 画面に表示した QR コードを上記の方法で読み取るという予備実験を行なった。これによって得られた埋め込み可能な画像のサイズを参考とし、実際に紙面に印字した QR コードの読み取りを行なった。

4.2 評価結果

表 1 に評価結果を示す。1 行目が誤り訂正能力を用いた場合に読み込みが可能となった最大の画像サイズの符号化領域に占める割合を表し、2 行目が非組織符号化による画像埋め込みを用いた場合に読み込みが可能となった最大の画像のサイズ符号化領域に占める割合を表す。

誤り訂正能力を用いてロゴ a の画像を最大サイズで埋め込んだ QR コードを図 7 に示す。また、非組織符号化による画像埋め込みを用いてロゴ a の画像を最大サイズで埋め込んだ QR コードを図 8 に示す。その他の画像についても同様に、誤り訂正能力による方式と非組織符号化による画像埋め込み方式で最大サイズまでロゴ b の画像を埋め込んだ QR コードを図 9 と図 10 に、ロゴ c の画像を埋め込んだ QR コードを図 11 と図 12 に、人物 a の画像を埋め込んだ QR コードを図 13 と図 14 に、人物 b の画像を埋め込んだ QR コードを図 15 と図 16 にそれぞれ示す。



図 13 誤り訂正能力による人物 a の最大埋め込みサイズ



図 14 非組織符号化による人物 a の最大埋め込みサイズ



図 15 誤り訂正能力による人物 b の最大埋め込みサイズ



図 16 非組織符号化による人物 b の最大埋め込みサイズ

5 実環境における埋め込み可能な画像の大きさに関する考察

4 章における評価結果の考察を行う。非組織符号化を用いて画像埋め込みを行なった結果を、誤り訂正能力を使用する画像埋め込み方式と比較する。ロゴ b については同等の画像サイズまでしか埋め込みが行えなかった

が、その他の画像においては非組織符号化を利用した場合に誤り訂正能力を用いる場合よりも大きい画像の埋め込みが可能であった。ロゴ a, ロゴ c, 人物 b の場合には誤り訂正能力を用いる場合の理論上の限界値である 30% を上回る領域に画像埋め込みを行うことが可能であった。特にロゴ c においては誤り訂正能力での限界を大きく上回る 43% まで埋め込みを行うことが可能であった。この理由として、ロゴ c の画像を二値化した結果が白モジュールの塊と黒モジュールの塊にはっきりと別れるためデコーダでのモジュールの明暗判定が特に容易に行えたためだと考えられる。

以上の結果から、非組織符号化を用いた画像埋め込み方式を用いることで実際の環境下においても誤り訂正能力を利用した画像埋め込みよりも大きな領域に画像を埋め込むことが可能であることが確認できた。また、元となる画像によっては誤り訂正能力を用いた場合の埋め込み画像の大きさの限界値である 30% を大きく上回る領域に対して画像埋め込みが可能となった。

6 まとめ

本研究では、非組織符号化を用いた QR コードへの画像埋め込みを行い、紙面に印字した QR コードをスマートフォンで読み取るという実際の環境下での評価を行った。この結果、従来方式である誤り訂正能力を用いた画像埋め込みの理論上の限界値である符号化領域の約 30% よりも多くの領域に画像埋め込みを行うことが可能なことを示した。また、実環境における読み取りが可能な画像埋め込み QR コードについて、非組織符号化による画像埋め込みによって、埋め込み画像の最大の大きさを誤り訂正能力を用いた場合より大きくできることを示した。

埋め込み可能な画像の大きさは、埋め込みを行う画像上の各画素間の相関関係などの状況に依存していると考えられる。今後はこれらの条件についても検討を行うことで、さらに大きな画像を埋め込むの方法について研究を行う。

参考文献

- [1] 日本工業規格, JIS,X0510, 二次元コードシンボル—QR コード—元本仕様, 2004.
- [2] DENSO WAVE INCORPORATED,QRcode.com, <http://www.denso-wave.com/qrcode/>, 2010.
- [3] 今井秀樹, 符号理論, 電子情報通信学会, 1990.
- [4] IT DeSign Inc.,designQR, <http://d-qr.net/index.htm>, 2010.
- [5] A・Tcommunications CO.,LogoQ, <http://logoq.net/logoq/index.html>, 2010.
- [6] HAGIWARA Manabu,QR-JAM, <http://staff.aist.go.jp/hagiwara.hagiwara/qrijam/index.html>, 2010.
- [7] NAMCO BANDAI Games Inc., 特許公開 2008 - 052588, 2008.
- [8] 藤田和謙, 栗林実, 森井昌克, “QR コードへの画像埋め込みに関する検討と提案,” IEICE Tech Rep., LOIS, vol.110, no.374, pp.39-44, 2011.
- [9] QR Droid,DroidLa, available at https://play.google.com/store/apps/details?id=la.droid.qr&feature=related_apps#?t=W251bGwsMSwxLDEwOSwibGEuZHZJvaWQucXIiXQ...
- [10] Qr Barcode Scanner,Warriors,available at https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.\ai_progetto2003.SCAN&feature=search_result#?t=W251bGwsMSwyLDEsImFwcGludmVudG9\yLmFpX3Byb2dldHRvMjAwMy5TQ0FOI10..
- [11] QR コードリーダー EQS, イクス株式会社, available at <https://play.google.com/store/apps/details?id4=jp.eqs.apps>.
- [12] EPSON Colorio PM-A970,SEIKO EPSON CORPORATION,available at <http://www.epson.jp/manual/pma970/index.html>.