

3次元カラーバーコードとその読み取り性能評価 3D Color Barcode and its reading performance evaluation

宮本 直樹[†]
Naoki Miyamoto

奥田 信也[†]
Shinya Okuda

六井 淳[†]
Jun Rokui

1. はじめに

これまで、多様なバーコードが開発されてきた。元来、バーコードは横方向のみの1次元にしか情報を持たなかったが、近年では2次元2値バーコード(白黒)が普及してきた[1]。これは水平・垂直方向に情報をもつため格納できる情報が多く、数字、漢字、記号、バイナリなど様々なデータを扱うことが可能であり[2]、旧来の1次元バーコードに比べて大容量のデータを扱うことができるようになった。米国を中心に世界的にはPDF417などが普及しており[3]、一方、日本では携帯電話やスマートフォンなどの普及によりQRコードが主流となっている[1]。2次元バーコードを大容量化する手法としては、アルゴリズムの改良、もしくは白黒2値以外に対応した多色化の2種類が挙げられている。多色化したバーコードの研究では、ColorCode[4]、HCCB(High Capacity Color Barcode)[5]、本研究で取り扱う3次元カラーバーコードなどがある[6]。

カラーバーコードは印刷機、印刷用紙、光源など様々な要因によってバーコードの配色が変化してしまい、各セルの正しい情報を抽出することが困難であった。配色の劣化の原因は印刷機器、光源などの環境によるRGB値の変化である。配色の劣化前のRGBヒストグラムと、劣化後のRGBヒストグラムとの形状を比較することで欠損を確認することができる。RGBヒストグラムを統計モデルとして混合正規分布とみなし、組み合わせ最適化問題として定式化を図る。未知パラメータ集合を変化した配色の平均、分散と定め、EMアルゴリズムを用いて未知パラメータを求めることで元データの配色を推定する。また、異なる配色のセルどうしが隣接することも配色の劣化の一因であった。セル間の隣接する部分を最小にするべく、セルの形状を真円に変更することで問題の解決を図った。

2. 3次元カラーバーコード

2.1. 多層化と重ね合わせ

本研究で取り扱う3次元カラーバーコードは、従来のカラーバーコードと比較して、1セルの情報量は変わらない。従来のバーコードとの違いは、3次元カラーバーコードは配置の仕方を階層化することである。2次元2値バーコードを各層として、多層化することによって、層毎に異なる情報を持たせ、多様なデータを扱える大容量のバーコードを実現した。

2次元2値バーコードを多層化しただけではデータ

ドとして表現することができない。2次元のバーコードとして表現するため、各層のbit(0,1)の組み合わせから各セルに配色を割り当てることによって層の重ね合わせを行う。層毎に2値の組み合わせがあるため、3次元カラーバーコードの配色パターンは 2^n 色(n :層数)となる。例として、2層の場合は $\{(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)\}$ のbitの組み合わせがあり、配色パターンは4色となる。2層の場合の重ね合わせでできた3次元カラーバーコードを図1に示す。

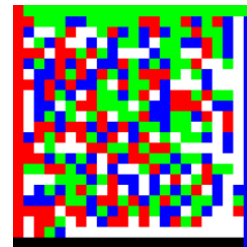


図1: 2層4色の場合の3次元カラーバーコード

2次元2値バーコードを多層化して、重ね合わせることによって配色を定め、最終的に 2^n 色(n :層数)の配色パターンをもった3次元カラーバーコードを生成することができる。

2.2. 仕様

本研究の3次元カラーバーコードは正方形になるようにセルを配置する。また、方向補正、コード部の抽出を行うために外枠部分の上下左右それぞれを色分けしている。図2に示すデータ部、プロトタイプ部、予備のプロトタイプ部がコード部にあたる。

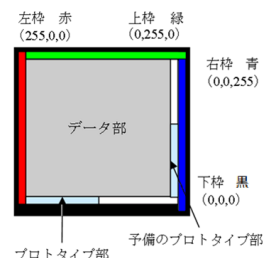


図2: 3次元カラーバーコードの仕様図

[†]島根大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻情報システム学コース, Department of Mathematics and Computer Science Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering Shimane University

2.3. プロトタイプセル

プロトタイプ部、予備のプロトタイプ部に存在するプロトタイプセルは配色の推定に用いる。配色推定において、劣化前の配色と推定した配色を安定して1対1対応させることが目的である。プロトタイプセルの役割は次のようになっている。

生成時

- 各 bit 列の組み合わせに応じたプロトタイプセルを生成

読み取り時

- EM アルゴリズムに用いる初期値を取得
- 推定した配色の指標に用いる

生成時において、各 bit 列における組み合わせに対応したプロトタイプセルを生成する。

読み取り時には、劣化したプロトタイプセルから EM アルゴリズムの初期値を求め、配色推定を行う。配色推定後、復号されたプロトタイプセルを用いることで元の配色と1対1対応させる指標とする。生成時、読み取り時におけるプロトタイプセル使用の例を図3に示す。

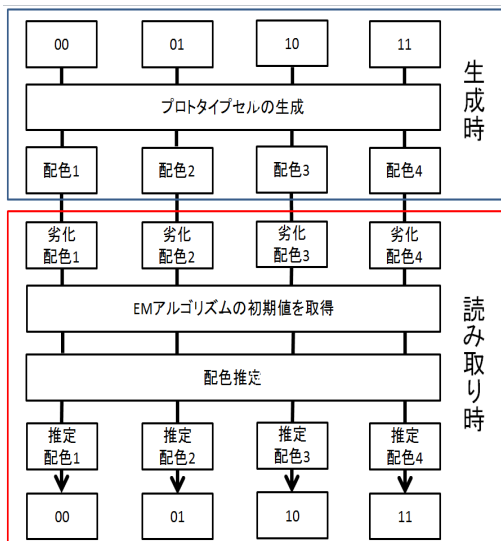


図3: プロトタイプセル使用の流れ

図3では、2層4色の場合を例として、(00,01,10,11)のbit列を与えた場合を示している。生成時に各々のbit列に対応したプロトタイプセルを生成する。読み取り時には、印刷等で配色が劣化しており、劣化したプロトタイプセルから配色推定に用いるEMアルゴリズムの初期値を取得する。配色推定後、推定配色を各々のbit列に割り当てる。

3. 読み取りアルゴリズム

配色の劣化を考慮し、元データの配色を推定する必要がある。劣化前と劣化後のRGBヒストグラムを混

合正規分布とみなして定式化し、EMアルゴリズムによってRGB値の推定を行う。

3.1. 統計モデル化

RGB値の統計モデル化について触れる。2色の配色で構成される3次元カラーバーコードをサンプルコードとして用いる。混合正規分布とみなし、統計モデル化の概要を描いた図を図4に示す。

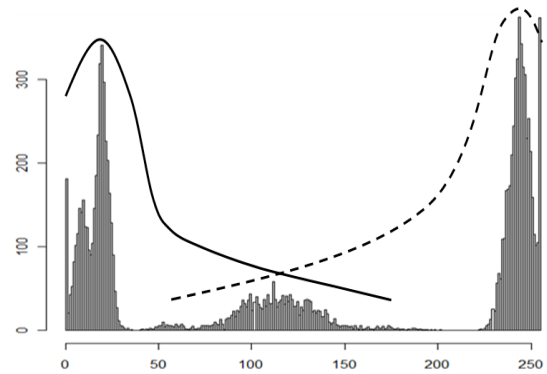


図4: 統計モデル化の概要

図4の縦軸は画素数、横軸はRGB値を表している。実線及び点線は混合正規分布において、実線は青、点線は赤を示した線である。混合正規分布の起伏は、各ピクセルを確率変数とみなした際の確率密度の粗密を表し、どちらの分布にも属する可能性のあるデータを分布間で共有する特徴がある。これらから詳細な色の識別ができ、劣化前の配色状態を求めていくことができる。

3.2. EMアルゴリズム

EMアルゴリズムは統計学において古くから用いられてきた手法である[7]。EMアルゴリズムは解を逐次改良していく繰り返し探索のアルゴリズムであり、音声認識などに用いられている。今、 N 個のデータ Z が観測データ X 、非観測データ Y 、未知パラメータ Θ からなる時、確率密度関数族は $p(X, Y; \Theta)$ である。 Θ の最尤推定値は、観測データの対数尤度関数族

$$L(\Theta; X) := \log p(X; \Theta) = \log \int p(X, Y; \Theta) dY \quad (1)$$

を最大化する Θ である[8]。一方EMアルゴリズムの場合、完全データ対数尤度関数

$$L_c(\Theta; Z) := \log p(X, Y; \Theta) \quad (2)$$

の条件付き期待値(Q 関数)の逐次最大化によって、式(2)を実現する。

第 t 回目のパラメータ推定値を $\Theta^{(t)}$ とする。第 $t+1$ 回目の反復時は、最初にE(Expectation)ステップで Q 関数

$$Q(\Theta | \Theta^{(t)}) := E\{L_c(\Theta; Z) | X; \Theta^{(t)}\} \quad (3)$$

を計算する。次に、M(Maximization)ステップでQ関数を最大にする Θ を求める。最後に Θ を $\Theta^{(t+1)}$ とし、Eステップに戻る。以上のEMアルゴリズムを整理し、以下に示す。

ステップ1 初期値 $\Theta^{(0)}$ を設定。 $t \leftarrow 0$ とする。

ステップ2 以下を収束するまで繰り返す。

Eステップ $Q(\Theta | \Theta^{(t)})$ を計算する。

Mステップ $\Theta^{(t+1)} = \operatorname{argmax}_{\Theta} Q(\Theta | \Theta^{(t)})$ とする。

3.3. EMアルゴリズムの混合正規分布への適用

EMアルゴリズムを混合正規分布モデルへ適用する。Eステップでは、未知パラメータを用いてQ関数を求める。観測データを x 、データ数を N とした時、 a 次元正規分布は

$$N(x|\mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{a/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)}{2}\right\} \quad (4)$$

と表される。式(4)を m 混合正規分布に適用させた式は

$$\sum_{M=1}^m \pi_M N(x|\mu_M, \Sigma_M) \quad \left(\sum_{M=1}^m \pi_M = 1\right) \quad (5)$$

となる。式(5)において、未知パラメータ集合となる重みを π 、平均を μ 、共分散行列を Σ とする。これらの未知パラメータは、プロトタイプセルの劣化から初期値を設定する。未知パラメータ集合を用いて、Q関数

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^m \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^m N(x_n|\mu_j, \Sigma_j)} \quad \{\log \pi_k + \log N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)\} \quad (6)$$

を求める。

次にMステップでは、未知パラメータ集合の最適化を行う。それぞれ、未知パラメータ集合を最適化すると

$$\mu_k^{new} = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N x_n \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^m N(x_n|\mu_j, \Sigma_j)} \quad (7)$$

$$\Sigma_k^{new} = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^m N(x_n|\mu_j, \Sigma_j)} \quad (8)$$

$$(x_n - \mu_k)((x_n - \mu_k)^T) \quad \pi_k^{new} = \frac{N_k}{N} \quad (9)$$

$$N = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^m x_n \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^m N(x_n|\mu_j, \Sigma_j)}$$

$$N_k = \sum_{n=1}^N x_n \frac{\pi_k N(x_n|\mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{j=1}^m N(x_n|\mu_j, \Sigma_j)}$$

となる。最適化した値を新しい未知パラメータ集合として、Eステップへ戻る。ステップを繰り返し、最終的に求めた μ_k が、推定配色のRGB成分となる。

4. セルの真円化

従来のバーコードはセルの形状が正方形であった。正方形セルは隣接したセルの配色の影響を大きく受ける。確認として、正方形セルの3次元カラーバーコードを劣化前と劣化後で比較した。劣化前の画像を図5に、劣化の画像を図6に示す。

劣化後は隣接セルの影響を受けて、大きく配色が変化

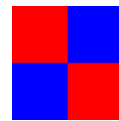


図5: 劣化前

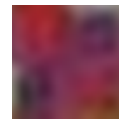


図6: 劣化後

しているのが確認できる。

解決法の一例として、セル間に空白を設け、他セルの影響を抑える方法があるが、この手法はバーコードそのもののサイズを肥大化させてしまうというデメリットがある。図7に従来の正方形セルバーコードを、図8に空白を設けた場合のバーコードを示し、バーコードサイズ肥大化の問題を確認する。

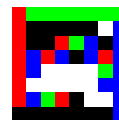


図7: 従来の正方形セル

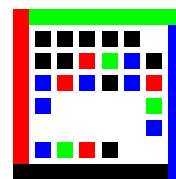


図8: 空白を設けた場合の正方形セル

バーコードサイズの肥大化を避け、かつ配色の影響を

抑えるためにはセル間に空白を挟まず隣接セルとの接点を最小限に抑える必要がある。そこで、セルを真円で表す手法を考案した。真円セルでは、従来の正方形セルを用いた 3 次元カラーバーコードと同サイズで、隣接セルとの接点を最小限に抑えることができる。真円セルで表現した 3 次元カラーバーコードの様子を図 9 に示す。



図 9: 真円セルを用いた 3 次元カラーバーコード

5. システム実装

5.1. 生成処理

ユーザーが作成した任意のデータを読み取りバイナリ変換を行う。生成したバイナリデータに対して多層化処理、重ね合わせを行うことによってセルの配色を求める。Michener のアルゴリズムによって描いた真円セルを求めた配色で塗りつぶし、3 次元カラーバーコードが生成される [9]。手順を以下にまとめる。

- ・ ユーザが任意のデータを生成、選択する
- ・ 生成データを読み取りバイナリ変換を行う
- ・ 多層化、重ね合わせ処理により配色決定
- ・ 3 次元カラーバーコードの生成

5.2. 抽出処理

抽出処理ではユーザーがデバイスのカメラを使ってコード抽出を行う。カメラによって撮影されたコードに対して、ノイズ除去にはメディアンフィルタを用いた [10]。各ピクセルデータに対して NTSC グレースケール変換式

$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (10)$$

を用いてグレースケール化を行う [11]。グレースケール化したピクセルデータに対して、勾配強度を求め上位 10% の数を閾値と定める。図 1 2 のように水平、垂直方向においてエッジがピークとなる座標の交点を求める。これによりバーコードの輪郭を取得する。

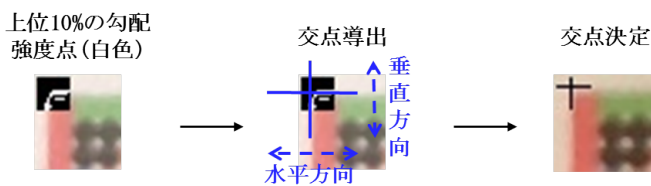


図 10: 交点導出

左上の交点を $(X1, Y1)$ 、右下の交点を終点 $(X2, Y2)$ とし、次の式で辺の長さを統一する。

$$1 \text{ 辺の長さ} = \{(X2 - X1) + (Y2 - Y1)\} / 2 \quad (11)$$

これにより、(11) 式で求めた辺の長さで正方形化したバーコード抽出が可能になる。手順を以下にまとめる。

- ・ カメラによるバーコードの撮影
- ・ 撮影したバーコードのノイズ除去
- ・ グレースケール化
- ・ 勾配強度の算出
- ・ 閾値の算出
- ・ 抽出範囲の正方形化
- ・ バーコードの抽出、生成

5.3. 読み取り処理

保存されたバーコードに対して、統計モデルを用いた配色推定法を行う。推定した配色に復号処理を行い、データの復号がなされる。手順を以下に示す。

- ・ バーコード選択
- ・ 正規分布による配色推定
- ・ 復号
- ・ 復号データの取得

なお、復号処理の手順については次の通りとなる。

- ・ 平均 RGB 成分を求める
- ・ 差分をとる
- ・ 差分が最小となる配色を求める
- ・ ビット列に復号する

復号処理において、まず「1 セルの真円の直径 - 2」を 1 辺とした正方形の範囲内における平均 RGB 成分 (Ra, Ga, Ba) を求める。本範囲を定めることで、白色のセルの混在を減らす。次に、平均 RGB 成分と推定した各配色の RGB 成分 (Rn, Gn, Bn) との差分

$$|Ra - Rn| + |Ga - Gn| + |Ba - Bn| \quad (12)$$

を求める。差分が最小となった配色をセルの配色と定める。そして、定まった配色に基づいたビット列に復号する。以上の工程が 1 セルに対しての処理である。この工程を全てのセルに対し行うことで、元データに復号することができる。

6. 検証実験

6.1. 抽出方法比較実験

3次元カラーバーコードの抽出処理においてエッジ抽出がある。エッジ抽出方法として、Gradient フィルター [12]、Roberts フィルター [13]、Prewitt フィルター [14]、Sobel フィルター [15]、4方向と8方向のLaplacian フィルター [16] の6種類の抽出処理と手動抽出による読み取りを、蛍光灯が光源である室内にて比較実験を行った。6つの抽出方法による実験の結果を表1に示す。

表 1: 6抽出方法と手動による実験結果

	読み取り率
手動	97%
Gradient	63%
Roberts	71%
Prewitt	32%
Sobel	49%
Laplacian(4方向)	55%
Laplacian(8方向)	53%

手動の読み取り精度は高く、このことから提案した配色推定方法自体は妥当であると考えられる。手動処理結果を指標とし、手動処理の結果に近いほど理想的な手法であるが、比較的良好な手法は Gradient フィルターと Roberts フィルターであった。Gradient フィルターと Roberts フィルターは簡単な被写体と相性がよく、3次元カラーバーコードのシンプルな外形に適している。

また、良好な結果を得た Gradient フィルターと Roberts フィルターについて、どちらがより抽出処理に適した手法であるかの検証を行った。蛍光灯2か所、白熱灯2か所、日向、日陰のそれぞれ異なる光源における環境で実験を行った。Gradient フィルターの実験結果を表2に、Roberts フィルターの実験結果を表3に示す。

表 2: 実験結果 (Gradient) 表 3: 実験結果 (Roberts)

	読み取り率
蛍光灯 1	67%
蛍光灯 2	77%
日陰	74%
日向	84%
白熱灯 1	73%
白熱灯 2	78%
平均	75.5%

	読み取り率
蛍光灯 1	71%
蛍光灯 2	76%
日陰	88%
日向	72%
白熱灯 1	97%
白熱灯 2	80%
平均	80.7%

結果を比較してみると、Roberts フィルターの方が Gradient フィルターよりも多環境において同等以上の数値となった。特に白熱灯1では手動抽出と同程度の精度であった。

6.2. セル形状比較実験

真円セルの有効性を確認するための比較実験を行った。真円セルで行った6.1に対して、正方形セルを用いた実験を行い、比較することで精度の有効性を調べる。なお、比較実験は真円セル、正方形セルともに抽出処理は Roberts フィルターを用い、同じ光源による実験環境で行った。正方形セルの結果を表4に、真円セルの結果を表5に示す。

表 4: 実験結果 (正方形セル) 表 5: 実験結果 (真円セル)

	読み取り率
蛍光灯 1	50%
蛍光灯 2	58%
日陰	62%
日向	73%
白熱灯 1	85%
白熱灯 2	65%
平均	65.5%

	読み取り率
蛍光灯 1	71%
蛍光灯 2	76%
日陰	88%
日向	72%
白熱灯 1	97%
白熱灯 2	80%
平均	80.7%

結果を比較すると真円セルのほうが全ての環境において、良好な結果であった。この結果から、真円セルはセル間の配色の影響を抑え、真円セルの有効性が確認された。

7. まとめ

2次元2値配列を多層化して配置することで、多様なデータを扱える大容量の3次元カラーバーコードシステムについて、様々な環境で評価実験を行うため、要素技術を一体化しアプリケーションとして検証実験を行った。実装において、更なる読み取り精度向上のため、Michener のアルゴリズムを用いて真円セルを実現、実装し正方形セルとの比較実験を行った。結果として、真円セルは正方形セルよりも高い読み取り精度が得られた。また、バーコードサイズを肥大化することなく精度向上を図ることができた。抽出処理において、白熱灯や日陰など様々な光源において、最も高い読み取りを行えるエッジ抽出方法について比較実験を行った。結果、Roberts フィルターが最も有効的な手法であることが確認された。

高い読み取り数値を出した真円セル、Roberts フィルターも光源において読み取り精度にばらつきがあったため、光源を考慮した適切な配色パターンを検証する必要がある。

参考文献

- [1] 長屋 隆之, 山崎 知彦, 原 昌宏, 野尻 忠雄, “高速読み取り対応 2 次元コード [QR コード] の開発”, 情報処理学会第 52 回 (平成 8 年前期 (2)) 全国大会講演論文集, pp.253-254 (1996)
- [2] HU Donghong, CHEN Ximeng, YU Dan, HU Donghong, LI Dehua, “Algorithm for Detecting the Rows Boundary of the PDF417 Barcode”, Proc SPIE Int Soc Opt Eng, Vol.6043 No.Pt.2 Page.60431Z.1-60431Z.12 (2005)
- [3] 岩間 司, 白江 久純, 西浦 稔修, 鈴木 こおじ, 上釜 和人, “2 次元バーコードを用いた郵便情報システムに関する調査研究”, 郵政研究月報, No.8, pp.24-38 (2000)
- [4] Hiroko Kato, Keng T.Tan “Pervasive 2D Barcodes for Camera Phone Applications”, IEEE Pervasive Computing, pp.76-85 (2007)
- [5] Devi Parikh, Gavin Jancke, “Localization and Segmentation of A 2D High Capacity Color Barcode, Application of Computer Vision”, IEEE Workshop (2008)
- [6] 奥田 信也, 六井 淳, “3 次元カラーバーコード生成, 読み取りアプリケーションの開発”, FIT2012 第 11 回情報科学技術レクチャー, pp.579-584(2012)
- [7] 赤穂 昭太郎, “EM アルゴリズムの幾何学”, 情報処理 37(1), pp.43-51 (1996)
- [8] 上田 修功, 中野 良平, “混合モデルのための併合分割操作付き EM アルゴリズム”, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J82-D-II(5), pp.930-940 (1999)
- [9] J.D. Foley, A. Van Dam, “コンピュータ・グラフィックス”, 日本コンピュータ協会 (1984)
- [10] 渡邊 良亮, 阿部 公輝, “画像処理の逐次実行を実装例とした動的再構成可能プロセッサの評価”, 電子情報通信学会技術研究報告. SIP, 信号処理 108(108), pp.57-62 (2008)
- [11] 松村 将太郎, 熊澤 逸夫, “連続境界条件を導入した画像のブロック分割によるグレースケール変換”, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J90-D(8), pp.1977-1986 (2007)
- [12] 藤吉 弘亘, “Gradient ベースの特徴抽出”, 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア]
- [13] L. G. Roberts, “Machine perception of three-dimensional solids”, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering (1963)
- [14] 原 武史, 大塚 修, 藤田 広志, 遠藤 登喜子, “マンモグラム CAD システムにおける Prewitt フィルタを利用した腫瘤陰影の偽陽性候補の削除”, 日本放射線技術学会雑誌 56(3), pp.449-454 (2000)
- [15] 松原 友子, 原 武史, 藤田 広志, 遠藤 登喜子, 岩瀬 拓士, 堀田 勝平, “マンモグラム CAD システムにおける乳房スキンの自動抽出処理”, 日本放射線技術学会雑誌 56(3), pp.480-485, (2000)
- [16] 村中 徳明, 工藤 新也, 芦田 高則, 徳丸 正孝, 今西 茂, “ラプラス-ガウスフィルタを用いた多値画像輪郭抽出法”, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J85-D-II(10), pp.1503-1512 (2002) 2007(87), pp.211-224 (2007)