

動的輪郭モデルを用いたストライプ状クロマキー

Stripe Chromakey Using Active Contour Models

正会員 山下 淳^{†,††}, 縣 弘樹[†], 正会員 金子 透[†]Atsushi Yamashita^{†,††}, Hiroki Agata[†] and Toru Kaneko[†]

Abstract We propose a new region extraction and image composition method with chromakey using a two-tone striped background and active contour models. A problem with using conventional chromakey techniques is that if objects have the same color, they appear to be part of the background. To improve the clarity of the image, we utilized adjacency conditions between two-tone striped areas on the background, and extracted foreground regions whose colors are same as those of the background. In addition, by using active contour models for the extraction result, we significantly improved the accuracy of the extraction. The validity of our method was shown through experiments.

キーワード : Stripe Background, Active Contour Model, Chromakey, Region Extraction, Image Composition

1. ま え が き

本論文では、ストライプ状背景を用いたクロマキーにより、簡単かつ汎用的に領域抽出を行う手法を提案する。

画像合成技術¹⁾は、人物と別の場所で撮影された風景の合成用途に用いられることが多く、雑誌の表紙・プロモーションビデオ・映画の作成やテレビ放送など様々な分野で利用されている。また近年では、合成する画像間の位置関係や視点を考慮した画像合成を用いた放送システム^{2)~4)}も提案されており、非常に重要な技術となっている。

画像合成を行うためには、画像から特定の領域を切り出す必要がある。そこで、これまでも数多くの領域抽出手法⁵⁾⁶⁾が提案されている。

特殊な撮影状況や撮影機材を必要としない領域抽出法としては、エッジ抽出や領域分割などを利用した方法が提案されている（例えば文献7）など）。カメラ台数が複数の場合には、ステレオカメラにより距離を計測した結果を利用し、ある一定の距離に存在する対象物のみを切り出して画像合成を行う手法⁸⁾⁹⁾も提案されている。しかし、高精度・高速・自動的に領域抽出を行うことができる汎用的手法を

構築することは困難である。

その他、例えば、画像合成のための対象物の切り出し法¹⁰⁾も提案されているが、多種類のパラメータを指定する必要があり、様々な状況に対応することは難しい。また、特別な背景を必要としない画像抽出方法¹¹⁾も提案されているが、同様に手間がかかりすぎるという問題がある。比較的簡単かつ高精度に領域抽出を行う手法^{12)~14)}も提案されているが、切り出したい対象の輪郭を大まかに指定するなど操作が必要であり、自動処理にはなっていない。

また、予め背景画像を取得しておき、現在の画像との差分をとることで自動的に領域抽出を行う方法¹⁵⁾¹⁶⁾も提案されているが、カメラの移動や照明条件の変動に対応することは困難である。

一方、特殊な撮影状況や撮影機器を利用して領域抽出を行う方法も提案されている。

特殊な撮影状況を用いた方法では、背景色や照明色を自由に变化させることができるスタジオを用いて領域抽出や画像合成を行う方法¹⁷⁾¹⁸⁾や、IR マットと呼ばれる赤外線による映像合成手法¹⁹⁾が提案されている。また、特殊な撮影機器を用いた方法では、画像撮影と同時に対象までの距離を計測可能なカメラを使用して画像合成を行う手法も提案されている²⁰⁾。このカメラを用いることにより、距離情報から目的の対象のみを抽出することが可能であり、実際のテレビ番組制作などに使用されている。その他、画像撮影と同時に温度（体温）を計測して画像合成を行う手法も提案されている²¹⁾。しかし、装置が高価かつ特殊なものであるため、誰もが気軽に開発・利用することができず、一般に普及するには至っていない。

そこで、簡単に領域抽出を行う手法として、撮影時の背

2006 年 6 月 28 日受付, 2006 年 11 月 29 日最終受付, 2007 年 1 月 9 日採録

[†] 静岡大学 工学部 機械工学科

(〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1, TEL 053-478-1067)

^{††} カリフォルニア工科大学 機械工学科

(米国カリフォルニア州バサデナ市)

[†] Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

(3-5-1, Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan)

^{††} Department of Mechanical Engineering, California Institute of Technology

(1200 E. California Blvd. MC104-44, Pasadena, CA 91125, U.S.A.)

景に制限を加えることにより領域抽出・画像合成を行うクロマキーと呼ばれる手法^{22)~26)}が提案されている。クロマキーは、青色や緑色などの単色で様な背景の前に対象物を配置して画像を取得し、背景と同じ色成分の画素を除去することにより対象物のみを切り出す方法である。この方法は、原理・処理方法が単純であることや、単一色の背景を準備するのみで良いことから、現在最も広く用いられている方法である。

クロマキーをはじめとする画像合成では、画素 (u, v) における合成画像の画素値 $I(u, v)$ は (1) 式で表される。

$$I(u, v) = \alpha(u, v)F(u, v) + (1 - \alpha(u, v))B(u, v), \quad (1)$$

ただし、 $F(u, v)$ は前景画像、 $B(u, v)$ は背景画像、 $\alpha(u, v)$ は α 値と呼ばれ 0 から 1 の値を取る¹⁾。

クロマキー合成においては、 α 値を高精度に決定することが重要であり、例えば、髪の毛の部分や透明なガラスなどにおいても非常に正確に α 値推定を行う手法が提案されている^{27)~33)}。

しかし、通常のクロマキーでは、抽出したい対象物の色が背景と同じ場合は、対象物が背景とみなされてしまい、正確に領域抽出ができないという問題点がある (図 1(a))。

そこで、背景の色を切り替えて撮影することにより、任意の色の対象物を抽出する方法³⁴⁾も提案されている (図 1(b))。しかし、この方法では対象物が静止した状態で背景を切り替える必要があるため、原理的に移動物体抽出やリアルタイム画像合成には適さない。

そこで我々は、2色から成るストライプ状の背景 (図 1(c)) を利用することにより、対象物の一部が背景とみなされても対象物と背景を正しく領域分割する手法³⁵⁾を提案した。しかし、背景色の判別処理のための RGB 値の閾値をヒューマンオペレータが多数決定しなければならず、手間がかかるという問題があった。また、対象物の輪郭部分での検出精度に問題があった。

そこで本論文では、撮影画像において人物のいない画面の端部に着目して背景色を自動推定する手法を構築する。さらに、精度良く対象物を抽出するために、ストライプ状背景を用いた対象物抽出画像に対して動的輪郭モデル⁷⁾を利用することで、対象物の輪郭を抽出し対象物と背景を精度良く領域分割する手法を提案する。

2. ストライプ状背景を用いたクロマキー

ストライプ状背景を用いた場合においても、色情報による領域分割のみでは従来のクロマキーと同様、背景と同一色の対象を抽出することができない。そこで2色の背景色が切り替わる部分 (以後、ストライプ境界と呼ぶ) に着目し、ストライプ境界の端点は抽出対象の輪郭と接するという性質を利用することで、背景と同一色の対象を抽出する*。

* ただし、前景領域により隠蔽された背景領域の大きさがストライプ幅よ

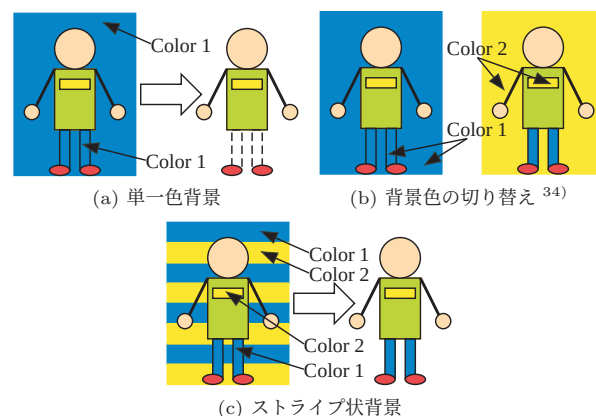


図 1 様々な背景を用いたクロマキーによる領域抽出
Region extraction with chromakey techniques using several types of the backgrounds.

本論文では、横方向の2色から成るストライプ状の背景 (図 1(c)) の前に領域抽出を行う対象物を配置し、撮影を行う。また、画面の左右端部ではストライプ状背景が隠れずに見えるように撮影することとする。

提案する領域抽出の処理手順は以下の通りである。

- (1) 背景色検出
ストライプ上をスキャンし、ストライプ状背景における背景色2色を検出する (図 2(a))。
- (2) ストライプ境界検出
2色の背景色の間にあるストライプ境界を検出する (図 2(b)(c))。
- (3) 前景抽出
ストライプ境界の端点を利用して、背景と同一色の前景部分を検出する (図 2(d))。
- (4) 輪郭検出
動的輪郭モデルを用いて対象物と背景を正確に分割し、前景部分を抽出する (図 2(e))。
- (5) 画像合成
抽出した前景と別の背景との画像合成を行う (図 2(f))。

ただし、本論文では領域抽出 (前景と背景の分離) を目的としており、自然な合成画像を生成するための厳密な α 値の推定や陰影の生成は行わないこととする。

2.1 背景色検出

背景色の検出は、色空間中で行う。 C_1 と C_2 をそれぞれ2色から成るストライプ状背景の色 (図 2(a))、 R_1 および R_2 を色がそれぞれ C_1 および C_2 の領域であるとする、領域 R_1 、 R_2 は以下の式で表される。

$$R_i = \{(u, v) | F(u, v) \in C_i(u, v)\}, \quad (2)$$

ただし、 $F(u, v)$ は画素 (u, v) の画素値 (色) である。なお、照明条件によっては画面の端部と中央部における各背景色

り小さく、かつその領域が両ストライプを跨がない場所に存在する場合には成立しない。この場合、色情報のみではその領域が前景か背景かの判別は原理的に不可能である。このような条件になる可能性は小さいと考え、本論文ではこの領域を背景と判定する。

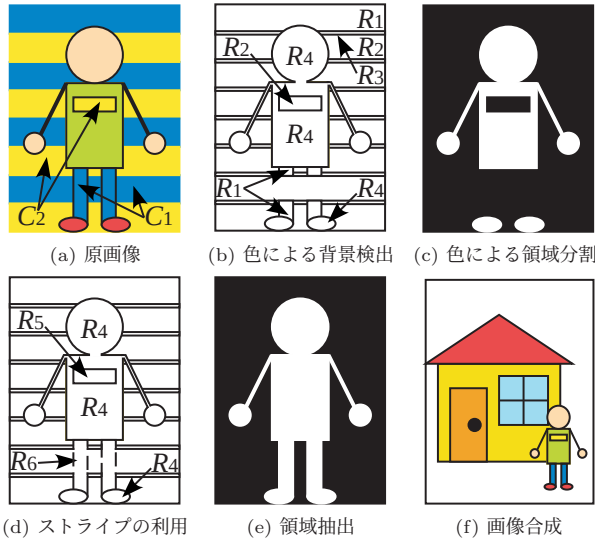


図 2 領域抽出
Region extraction.

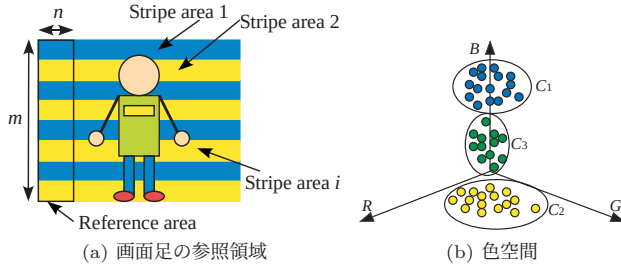


図 3 背景色の推定
Estimation of background colors.

は異なるため、正確には背景色は (2) 式のように $C_i(u, v)$ と書く必要があるが、以後 (u, v) を省略して記述することとする。

次に、画像中の C_1 および C_2 以外の色を C_3 とおくと、

$$C_3 = \{F | F \notin (C_1 \cup C_2)\}, \quad (3)$$

となる。抽出する対象の色やストライプ境界の色は C_3 に含まれる。これは、画像中の領域 R_1 と R_2 の境界には明確な区切りはなく、双方の色 C_1 と C_2 の混合色領域（ストライプ境界）になるためである。

背景色を検出するために、まず抽出対象が存在しない縦 m 画素、横 n 画素の画面端の画素の色に着目する。この領域を C_1 および C_2 決定のための参照範囲とする（図 3(a)）。この参照範囲における画素値の分布を RGB 空間で調べ、色の集まりから C_1 , C_2 , および C_3 （厳密には、参照範囲に存在する C_3 の部分集合）に分類する（図 3(b)）。

RGB 色空間における C_1 , C_2 , C_3 の分類には、K 平均法によるクラスタリングを用いる。これにより、自動的に画面両端の参照範囲内の背景色 C_1 , C_2 , およびそれ以外の色である C_3 の範囲をそれぞれ決定することができる。このとき画面両端の左右の区別は行わずに一緒に分類を行う。

次に参照領域内において、 C_1 , C_2 に分類されている画素の色成分の平均をそれぞれ求め、 $(r_{C_1}, g_{C_1}, b_{C_1})$,

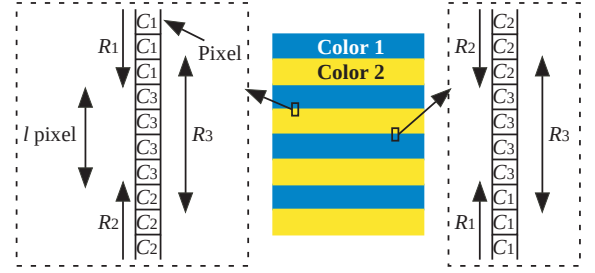


図 4 領域 R_3 の検出
Detection of R_3 region.

$(r_{C_2}, g_{C_2}, b_{C_2})$ とする。そして画像全体の各画素の RGB 成分 $(r(u, v), g(u, v), b(u, v))$ に対して、RGB 空間での距離 $d_1(u, v)$, $d_2(u, v)$ を求める。

$$d_i(u, v)^2 = (r_{C_i} - r(u, v))^2 + (g_{C_i} - g(u, v))^2 + (b_{C_i} - b(u, v))^2. \quad (4)$$

最後に画像全体を背景色 C_1 , C_2 およびその他の色 C_3 に分類する。このとき背景色分類のための閾値 T を用いて C_1 , C_2 の分類を行う。具体的には、 $d_1(u, v) < T$ ならば C_1 , $d_2(u, v) < T$ ならば C_2 に対象画素の色を分類する。どちらの条件も満たさない場合およびどちらの条件も満たす場合には背景色でない色 C_3 であるとする。

以上により、画像中のすべての領域において、色が C_1 または C_2 となる背景領域 R_1 , R_2 を検出することができる。

2.2 ストライプ境界検出

前述の通り、領域 R_1 と R_2 の境界には明確な区切りはなく、双方の色 C_1 と C_2 の混合色領域になる（図 2(b)）。この領域 R_1 と R_2 の間にあるストライプ境界の部分領域 R_3 と呼ぶことにする。領域 R_3 は、色が C_3 であり、上下を領域 R_1 と R_2 で囲まれている（図 4）。したがって、領域 R_3 はある大きさの幅をもち、上部が領域 R_1 の場合には下部が領域 R_2 、上部が領域 R_2 の場合には下部が領域 R_1 となるため、(5) 式で表すことができる。

$$R_3 = \{(u, v), (u, v + 1), \dots, (u, v + l + 1) | \\ F(u, v + 1) \in C_3, \dots, F(u, v + l) \in C_3, \\ ((F(u, v) \in C_1, F(u, v + l + 1) \in C_2) \text{ or } \\ (F(u, v) \in C_2, F(u, v + l + 1) \in C_1))\}, \quad (5)$$

ただし、 l は領域 R_3 の幅であり、画像の解像度の大きさに依存した値となる。

(5) 式は色情報と領域情報を両方用いているため、色のみを用いた方法やエッジ検出などのみを用いた方法と比較すると、領域 R_3 を非常に高精度に求めることができる。

以上の処理により、 R_1 , R_2 , R_3 を検出することができ、背景領域 R_{bg} は以下のように表すことができる。

$$R_{bg} = \{(u, v) | (u, v) \in (R_1 \cup R_2 \cup R_3)\}. \quad (6)$$

また、これ以外の領域 R_4 は、抽出すべき領域のうち背

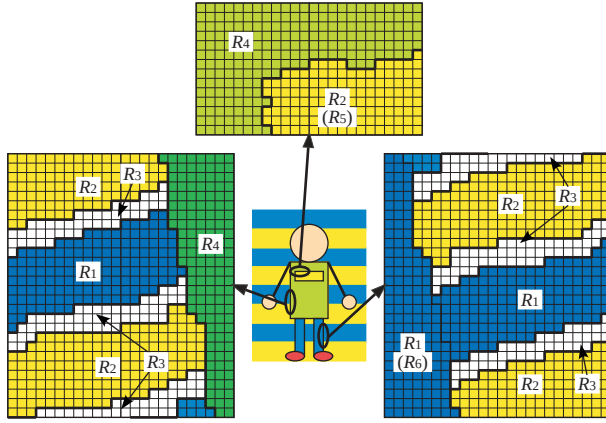


図 5 背景と同一色の領域
Boundary detection of foreground.

景と色が異なる部分である (図 2(c)).

$$\begin{aligned} R_4 &= \{(u, v) | F(u, v) \in C_3, (u, v) \notin R_3\} \\ &= \{(u, v) | (u, v) \notin R_{bg}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

ただし, 検出した背景領域の中には背景と同一色の対象物部分 (後述の領域 R_5 や R_6) も含まれるため, 以後の処理で背景の同一色の前景領域を識別する.

2.3 前景抽出

背景と同一色の対象物部分は, 2 種類の領域 R_5 , R_6 に分類できる (図 2(d)). 領域 R_5 は対象物の内部に存在する領域であり, 領域 R_6 は対象物の輪郭部分に存在する領域である (図 5).

領域 R_5 は, ストライプ境界である領域 R_3 との隣接条件により検出することができる. すべての背景領域は必ず領域 R_3 に接触している. それに対して, 領域 R_5 は対象物の内部に存在するため領域 R_3 に接触していない. したがって, 領域 R_5 は, 色が C_1 または C_2 の領域のうち, 領域 R_3 に接触していない領域を抽出することにより判別できる.

ここで, 領域 R_1 , R_2 , R_3 の検出は, 1 画素毎の処理により行っている. それに対して, 領域 R_5 の検出は領域毎に行う. 例えば, 領域 R_1 は 1 番上の背景の領域, 上から 3 番目の背景の領域, ... と隣接しない複数の領域から構成されている. そこで, それらの隣接しない領域 R_i の部分領域を $R_{i,j}$ とおく (図 6(a)). また, $adj(R_{i,j})$ を $R_{i,j}$ の輪郭と隣接する画素のうち $R_{i,j}$ に属していない画素の集合とすると (図 6(b)), 領域 R_5 は以下の式で表すことができる.

$$\begin{aligned} R_5 &= \{(u, v) | (u, v) \in R_{i,j}, R_{i,j} \subset (R_1 \cup R_2), \\ &\quad adj(R_{i,j}) \not\subset R_3\}. \end{aligned} \quad (8)$$

領域 R_6 についても同様に, 領域 R_3 を利用して検出を行う. 具体的には, 領域 R_3 の端点は必ず対象物の輪郭に接触していることを利用する.

まず, 各 R_3 領域を横方向に検索し, 領域 R_3 の直線近

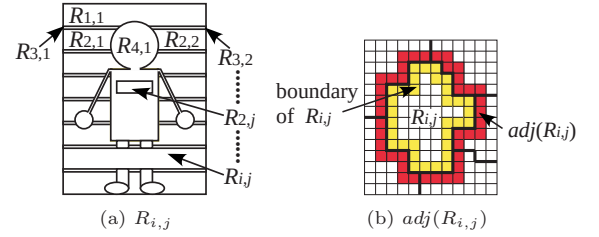


図 6 領域集合
Conjoint region.

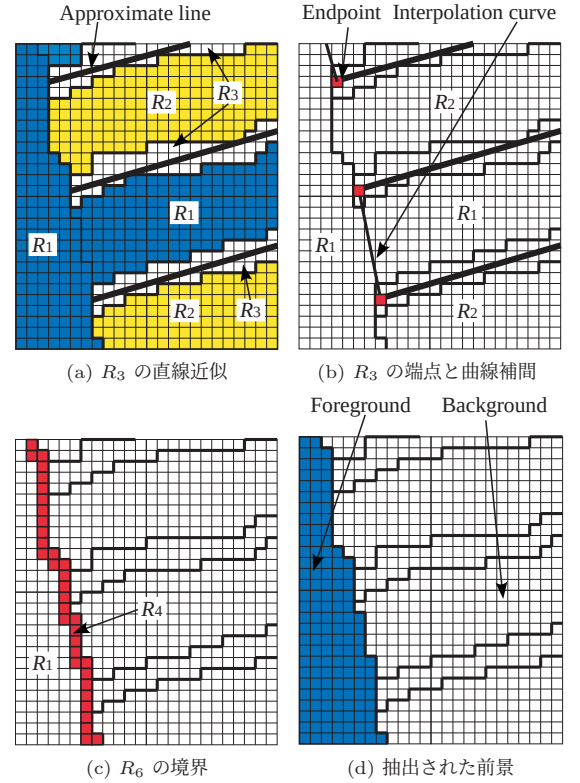


図 7 領域 R_6 の検出
Detection of R_6 region.

似を行い (図 7(a)), その端点を求める (図 7(b)). 領域 R_3 の端点のうち, 横方向に隣接する画素の色が C_1 または C_2 であった場合には, その領域は R_6 であると判別できる. そこで, このような端点間をスプライン曲線で補間して結ぶことにより失われてしまった対象物部分の輪郭を補間できる (図 7(b)). 最終的に補間したスプライン曲線上の画素を領域 R_4 に変換することで (図 7(c)), 領域 R_6 は領域 R_3 に隣接しない領域 R_1 または R_2 となる. したがって, (9) 式を用い, 領域 R_5 と同じ手順で検出することができる (図 7(d)).

$$\begin{aligned} R_6 &= \{(u, v) | (u, v) \in R_{i,j}, R_{i,j} \not\subset R_5, \\ &\quad R_{i,j} \subset (R_1 \cup R_2), adj(R_{i,j}) \not\subset R_3\}. \end{aligned} \quad (9)$$

以上の処理により, 領域 R_5 , R_6 を検出することができる. 最終的に抽出すべき対象物領域 R_{fg} は, 以下の式で表せる (図 2(e)).

$$R_{fg} = \{(u, v) | (u, v) \in (R_4 \cup R_5 \cup R_6)\}. \quad (10)$$

ただし、この抽出方法では対象物の輪郭はストライプの境界の端点を結んだだけであるため、正確な輪郭ではない可能性がある。そこで精度良く対象物を抽出するために詳細な輪郭検出を行う。

2.4 輪郭検出

対象物とその周りの背景を分割するために、対象物の輪郭を求める。輪郭抽出には動的輪郭モデル⁷⁾を利用する。

具体的には、画像平面 (u, v) 上の閉曲線 $\mathbf{c}_i = (u_i, v_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$, ただし $\mathbf{c}_{n+1} = \mathbf{c}_1$) を予め定義したエネルギーを最小化するように変形し、エネルギーの極小状態として輪郭形状を求める。本論文では動的輪郭モデルのエネルギーを (11) 式のように定めた。

$$E_{snakes} = E_{spline}(\mathbf{c}_i) + E_{image}(\mathbf{c}_i) + E_{area}(\mathbf{c}_i), \quad (11)$$

ただし、

$$E_{spline}(\mathbf{c}_i) = w_1 \sum_{i=1}^n |\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_{i-1}|^2 + w_2 \sum_{i=1}^n |\mathbf{c}_{i+1} - 2\mathbf{c}_i + \mathbf{c}_{i-1}|^2, \quad (12)$$

$$E_{image}(\mathbf{c}_i) = -w_3 \sum_{i=1}^n |\nabla I(\mathbf{c}_i)|, \quad (13)$$

$$E_{area}(\mathbf{c}_i) = w_4 \sum_{i=1}^n \{u_i(v_{i+1} - v_i) - v_i(u_{i+1} - u_i)\}. \quad (14)$$

$E_{spline}(\mathbf{c}_i)$ は輪郭モデルを滑らかにするエネルギー、 $E_{image}(\mathbf{c}_i)$ は輪郭モデルを画像中のエッジに引き寄せるエネルギー、 $E_{area}(\mathbf{c}_i)$ は輪郭モデルを凹形状・膨張に対応させるエネルギー³⁶⁾である。また、 $w_1 \sim w_4$ はそれぞれのエネルギーの重み係数であり、 $I(\mathbf{c}_i)$ は $\mathbf{c}_i$ における輝度を表す関数である。よって $|\nabla I(\mathbf{c}_i)|$ は $\mathbf{c}_i$ における輝度勾配の絶対値を表す。本論文では輝度勾配の絶対値を $|\nabla I(\mathbf{c}_i)|$ 、ストライプ境界以外の部分では (15) 式、ストライプ境界部分では (16) 式を用いてそれぞれ計算する。

$$|\nabla I(\mathbf{c}_i)| = |I(u_i + 1, v_i) - I(u_i, v_i)| + |I(u_i, v_i + 1) - I(u_i, v_i)|, \quad (15)$$

$$|\nabla I(\mathbf{c}_i)| = |I(u_i + 1, v_i) - I(u_i, v_i)|, \quad (16)$$

(16) 式は輝度勾配を横方向のみ計算したものである。一般的には輝度勾配は (15) 式のように縦方向成分を考慮するが、本手法ではストライプ境界部分で縦方向の輝度勾配をとると、その部分がエッジとなり輪郭モデルが引き寄せられる。そのため本手法ではストライプ境界部分において (16) 式のように横方向にのみ輝度勾配をとる。

また、図 8 のように腰に手を当てた人物が対象物の場合には、外側輪郭と内側輪郭の 2 種類の輪郭が存在する。外側輪郭の場合は初期位置から輪郭モデルが収縮すれば対象

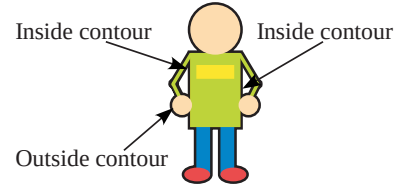


図 8 前景領域の輪郭
Foreground contour.

物の輪郭と一致し、内側輪郭の場合は初期位置から輪郭モデルが膨張すれば対象物の輪郭と一致する。一方、(14) 式のエネルギーにより、動的輪郭モデルは時計回りに座標を読込むと収縮し、反時計回りに座標を読込むと膨張する。よって境界追跡を行うとき、外側輪郭は時計回り、内側輪郭は反時計回りに追跡する³⁷⁾。

なお、外側輪郭と内側輪郭の判断は、画面端部（左上端）から輪郭を順番に探し、最初に見つかった輪郭が外側輪郭、その内側にある輪郭が内側輪郭といった手順で行う。

動的輪郭モデルの各エネルギーの重み係数 w_i は、抽出する対象の形状などにより値を変えなければならない。そのため、動画など画像の処理枚数が多く画像毎に対象物の形状が変化する場合、重み係数を各フレーム毎に自動的に決定することが望ましい。重み係数決定の際、輪郭モデルが囲む形状の周囲長 L （輪郭の画素数）、面積 S （輪郭が囲む領域の画素数）、円弧度 $e = 4\pi S/L^2$ を参考にする。

各エネルギーの性質として、周囲長 L が大きくなると E_{spline} の第 1 項のエネルギーと E_{image} は大きくなり、面積 S が大きくなると E_{area} は大きくなる。また形状が複雑、つまり円弧度 e が小さいほど E_{spline} の第 2 項のエネルギーは大きくなる。したがって、各エネルギーが大きくなるときは重みを小さくすれば良いと考えられる。重み係数の自動決定は動画の第 2 フレーム以降のみで行うとし、第 j フレームのそれぞれの重み係数は (17) 式～(20) 式のように決定する。

$$w_1(j) = \frac{a_1}{L(j)}, \quad (17)$$

$$w_2(j) = a_2 e(j), \quad (18)$$

$$w_3(j) = \frac{a_3}{L(j)}, \quad (19)$$

$$w_4(j) = \frac{a_4}{S(j)}, \quad (20)$$

ここで、 a_i は各重み係数決定の際のパラメーター（定数）であり、これらの値は予め第 1 フレームにおいて決めておく。また $L(j)$, $S(j)$, $e(j)$ はそれぞれ第 j フレームでの周囲長、面積、円弧度である。

以上の処理により正確な輪郭検出を行い、前景を抽出する。

2.5 画像合成

抽出した前景領域と新たな背景の合成は、抽出した領域の α 値を 1、背景部分の α 値を 0 と設定し、(1) 式を用いて行う。ただし、対象と背景の境界部分では、 α 値を 0 から 1 に連続的に線形変化させることにより、違和感のない

自然な合成を行う（図 2(f)）。

3. 実験

提案手法の有効性を検証するため、室内環境において実験を行った。2色のストライプの色はそれぞれ青、黄とし、市販の模造紙を張り合わせて背景を製作した。なお、背景色は人物を抽出対象と想定して試行錯誤的に決定した。具体的には、衣服や肌の部分は比較的連続的な輪郭を持っていることに対して、髪の毛は非常に細かい凹凸があるため、髪の毛の色の抽出の行い易さなどを考慮して色を決定した。基礎実験の結果、例えば、赤色の模造紙は茶色い髪の毛の色と判別しにくいなどの結果が出たため、人物の細かい部分を最も安定して抽出しやすい青色と黄色を選定した。ストライプの幅は 35mm とし、それ以下の小さな背景領域の穴は処理の対象外とした。また、背景色検出のための参照領域の幅は $n = 10$ 、背景色分類のための閾値は $T = 90$ 、ストライプ境界の幅は $l = 6$ と設定した。

領域抽出の例を図 9、図 10 に示す。図 9(a)、図 10(a) に写っている人物の腕には背景製作に使用した青色と黄色の模造紙を巻きつけ、胸には黄色の模造紙を貼り付けた。なおこれらの画像は、デジタルカメラを用いて 2400×1800 画素で撮影したが、対象物抽出に必要な部分を切り取り図 9(a) は 1084×1425 画素、図 10(a) は 1780×1520 画素にしたものである。

まず、通常の色情報のみを用いたクロマキーにより領域抽出を行ったところ、腕や胸の部分の抽出はできず透明となった（図 9(b)）。また、ストライプ境界が背景として検出されていないこともわかる。

それに対して、領域 R_3 との隣接関係を用いることにより、背景と同一色部分の輪郭を補間することができた（図 9(c)）。ただし、左腕を拡大した図 9(e) のように、対象物の輪郭が正確に抽出できていない部分も存在する。

次に動的輪郭モデルを用いて対象物の輪郭を抽出し、その情報から対象物と背景を分割した結果を図 9(d) に示す。輪郭が正確に抽出できていなかった部分についても、対象物周りのストライプ状背景と対象物が分割され、ほぼ正確に対象物を抽出できていることがわかる（図 9(f)）。

以上の結果、対象の色に関わらず前景の全領域を抽出することができ、別の背景との合成が可能となった（図 9(g)）。

また、照明条件を変化させて撮影し、かつ対象物内部にも輪郭がある例を図 10 に示す。本手法では照明条件の変化に対応するため背景色を自動的に決定している。また、本手法で用いている動的輪郭モデルには、輪郭モデルを膨張させるエネルギーが導入されている。そのため、照明条件変化があり、対象物に内側輪郭が存在する場合（図 10(a)）でも、対象物と背景を正確に分割し（図 10(b)）、画像合成できることが確認された（図 10(c)）。

その他、照明条件の変動への対応について検証を行うため、明るい環境（平均輝度値 146）から暗い環境（平均輝

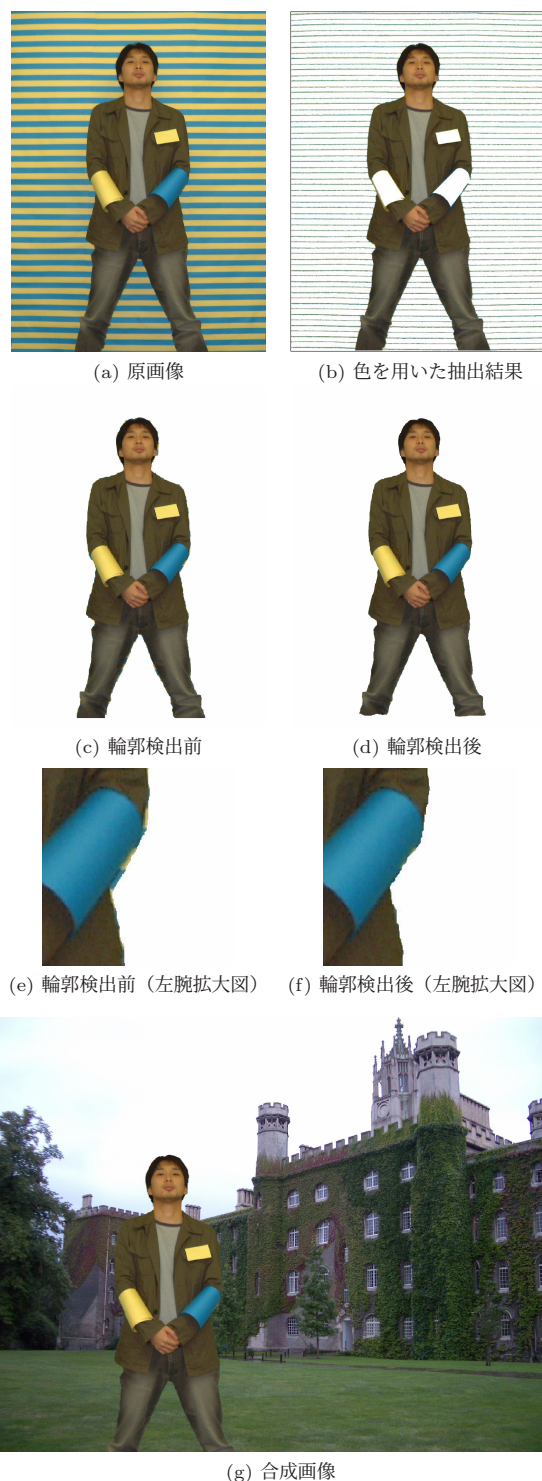


図 9 実験結果 I
Experimental result I.

度値 104) まで照明を変更して撮影した画像についても領域抽出を行った*。さらに、画面の端と中央で照明の当たり方が異なった画像についても検証を行った。文献 35) の背景色を固定閾値を用いて検出する手法と比較すると、従来手法では正しく背景色を認識できないことがあったことに対して、提案手法では自動的に背景色を推定し、失敗なく領域抽出が可能であることが確認された。ただし、照明条件

* 輝度値は 0 から 255 までの値をとる。



図 10 実験結果 II
Experimental result II.

の変化が大きい場合や、変化が小さいときでも背景とよく似たストライプ模様の物体を撮影する場合などには対応できないことが予想される。

なお、図 9 や図 10 のような画像を 1 枚処理するための計算時間は、一般的な計算機 (CPU: Pentium IV 2.8GHz, Memory: 512MB, OS: Windows2000) を使用して 30 秒以内であった。大まかな計算時間の内訳は、bmp ファイル読み込みから動的輪郭モデルによる輪郭検出の前までの処理が半分、輪郭検出から最終的な bmp ファイル書き出しまでの処理が半分である。

次に、動画画像合成結果を図 11 に示す。この実験でも同様に背景と同じ青色と黄色の模造紙を貼り付けた人物が動いている様子を撮影し、領域抽出を行った後、別の背景に合成した。なお、動的輪郭モデルの重み係数決定の際、(17)～(20) 式における a_i の値はそれぞれ試行錯誤的に $a_1 = 1300$, $a_2 = 1$, $a_3 = 450$, $a_4 = 9400$ と設定した。具体的な a_i の設定方法は以下の通りである。最初にすべての a_i の値を 1 と設定して処理結果の画像を調べる。次に、例えば、輪郭が滑らかすぎて人物の実際の輪郭と一致していない場合には、輪郭を滑らかにするエネルギーの影響が小さくなり、逆に画像中のエッジに引き寄せるエネルギーの影響が大きくなるように a_i の値を変更する。この処理を数回繰り返すことにより上記の値を得た。

この例では、最初は人物が 1 名のみしか見えていないが (図 11(a)～(b))、徐々に背後に隠れていた別の人物が現れ (図 11(c)～(j))、最終的には 2 名が完全に分離した状態となっている (図 11(k)～(n))。以上の結果により、対象物の

数や面積、形状が変化した場合にも正確に対象物を抽出できていることがわかる。なお、動的輪郭モデルを適用する前にほぼ正確に対象物の輪郭を検出できていることや、対象物の変化に頑健な文献 36) の方法をストライプ状背景用に改良したことなどが、この画像において対象物を正しく抽出できた原因であると考えられる。

ただし、動画合成では大きさ 640×480 画素の画像を使用したため、 2400×1800 画素の画像を使用した図 9、図 10 と比較すると、やや人物輪郭の検出精度が落ちることが確認された。これは、本論文では 1 画素毎に前景か背景かの判別を行っているため、解像度が小さくなると輪郭画素の検出粗さが相対的に目立つためである。

また、本論文においては画面端部が人物によって隠れることはないという前提で実験を行ったが、実際に隠れてしまった場合には最初のフレームの背景色の情報を利用するなどして対応することも今後の課題として考えられる。

誤検出例については、例えば、白い衣服を着た人物に黄色い光を当てて撮影を行うと、白い衣服の部分が背景として見なされるという問題があった。これは、黄色い照明により白い衣服が黄色の背景とほぼ同一色として見え、かつその領域の形状が複雑であり多数の領域に分離していたために、補間の処理を行えなかったことが原因であると考えられる。

ただし、上記の通り一部の条件では誤認識を引き起こすものの、ほとんどの場合において従来手法と比較して正確に領域抽出を行えることが実験により確認された。具体的には、通常のクロマキーでは対応できない背景色と同じ領域を抽出することが可能であった。さらに、文献 35) の方法では背景色判別のための閾値が固定であるため、一定以上の照明条件の変化に根本的に対応できなかったことに対して、本論文では対応することができた。

以上の結果により、対象物の色に関わらずある程度の照明変化がある場合にも正確に領域抽出が可能であることが確認された。また、対象物の数や面積、形状が変化した場合にも安定して対象物が抽出できることが示された。

4. む す び

本論文では、ストライプ状背景を領域抽出を行う手法を提案した。具体的には、ストライプ境界の情報を用いることにより、背景色と同一の対象物も抽出可能な方法を構築した。また、画面の端の色を参考にして背景色を自動的に推定することで、照明条件の変化にも対応する手法を提案した。さらに、動的輪郭モデルを用いることで正確に対象物の輪郭を検出する方法を構築した。

様々な条件の画像を用いた実験結果より、対象物の背景色部分を正しく抽出し、対象物の形状も高い精度で抽出ができていることが確認された。

今後の課題としては、文献 31) や 32) などに応用することにより切り出した対象物の輪郭部分の α 値をより詳細に推



図 11 実験結果 III
Experimental result III.

定して対象物と背景の境を違和感なく合成することや、背景パターンの工夫^{38)~40)}、位置関係や光源条件を考慮した合成を行うこと⁴¹⁾などが挙げられる。また、GPU (Graphics

Processing Unit) や専用ハードウェアを用いた処理速度の高速化も、リアルタイムでの実利用を想定する場合には必要であると考えられる。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C)17500067、および財団法人放送文化基金の補助を受けた。

(文 献)

- 1) T. Porter and T. Duff: "Compositing Digital Images", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH1984), **18**, 3, pp.253-259 (1984)
- 2) S. Shimoda, M. Hayashi and Y. Kanatsugu: "New Chroma-key Imaging Technique with Hi-Vision background", IEEE Trans. Broadcast., **35**, 4, pp.3570-361 (1989)
- 3) S. Gibbs, C. Arapis, C. Breiteneder, V. Lalioti, S. Mostafawy and J. Speier: "Virtual Studios: An Overview", IEEE Multimedia, **5**, 1, pp.18-35 (1998)
- 4) A. Wojdala: "Challenges of Virtual Set Technology", IEEE Multimedia, **5**, 1, pp.50-57 (1998)
- 5) K. S. Fu and J. K. Mui: "A Survey on Image Segmentation", Pattern Recognition, **13**, pp.3-16 (1981)
- 6) W. Skarbek and A. Koschan: "Colour Image Segmentation - A Survey", Technical Report 94-32, Technical University of Berlin, Department of Computer Science (1994)
- 7) M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos: "Snakes: Active Contour Models", International Journal of Computer Vision, **1**, 4, pp.321-331 (1988)
- 8) T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano and M. Tanaka: "A Stereo Machine for Video-Rate Dense Depth Mapping and its New Applications", Proc. 1996 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.196-202 (1996)
- 9) 山崎 俊太郎: "不十分な計測情報に基づく実物体の写実的な画像合成", 情報処理学会研究報告, 2004-CVIM-144, **2004**, 40, pp.215-230 (2004)
- 10) 中須 英輔: "画像合成のための対象物の切り出し法", NHK 技術月報, **30**, 12, pp.419-425 (1987)
- 11) 吉田 勝, 榎井 修平: "ビデオマットによる動画合成技術", テレビ学技報, **12**, 23, pp.29-34 (1988)
- 12) 井上 誠喜: "画像合成のための対象物抽出法", 信学論, **J74-D-II**, 10, pp.1411-1418 (1991)
- 13) 井上 誠喜, 小山 広毅: "動画画像合成のための対象物の抽出とはめ込み法", テレビ誌, **47**, 7, pp.999-1005 (1993)
- 14) T. Mitsunaga, Y. Yokoyama and T. Totsuka: "AutoKey: Human Assisted Key Extraction", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH1995), pp.265-272 (1995)
- 15) 小木 哲朗, 山田 俊朗, 玉川 憲, 廣瀬 通孝: "共有没入空間におけるビデオアバタを用いた位置関係表現", 信学論, **J82-D-II**, 10, pp.1826-1834 (1999)
- 16) R. J. Qian and M. I. Sezan: "Video Background Replacement without A Blue Screen", Proc. 1999 IEEE International Conference on Image Processing, pp.143-146 (1999)
- 17) 廣瀬 通孝, 小木 哲朗, 加納 真, 山田 俊朗: "没入型ディスプレイ間通信のための同期式クロマキー手法", 映像学技報, **24**, 34, pp.49-52 (2000)
- 18) P. Debevec, A. Wenger, C. Tchou, A. Gardner, J. Waese and T. Hawkins: "A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH2002), pp.547-556 (2002)
- 19) 三ツ峰 秀樹, 深谷 崇史, 山内 結子: "IR マットと全方位照明による環境合成", 画像ラボ, **17**, 2, pp.6-10 (2006)
- 20) M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai and K. Takizawa: "Axi-Vision Camera (Real-Time Distance-Mapping Camera)", Appl. Opt., **39**, 22, pp.3931-3939 (2000)
- 21) K. Yasuda, T. Naemura and H. Harashima: "Thermo-Key: Human Region Segmentation from Video", IEEE Computer Graphics and Applications, **24**, 1, pp.26-30 (2004)
- 22) 熊倉 国勝, 近藤 達彦: "高品位画面合成方式ソフトクロマキー", テレビ誌, **33**, 2, pp.106-110 (1979)
- 23) 奥田 治雄, 村上 敬之助: "コンポーネント信号用デジタルソフトクロマキー", テレビ学技報, **6**, 19, pp.7-12 (1982)
- 24) 篠原 延孝, 橋口 満洋, 井口 博之: "レベル適応型デジタル RGB クロマキー", テレビ学技報, **12**, 23, pp.19-24 (1988)
- 25) 筒井 健夫, 森近 治彦, 井口 博之: "レベル適応型デジタル RGB クロマキー", NHK 技術月報, **31**, 2, pp.63-70 (1988)
- 26) 山村 恵一: "コンポーネント・ラインクロマキー装置", テレビ学技報,

- 12, 23, pp.25–28 (1988)
- 27) 三島 也守志: “多面体スライスを用いたクロマキーのソフトウェア”, NICOGRAPH 論文集 1992, pp.44–52 (1992)
 - 28) D. E. Zongker, D. M. Werner, B. Curless and D. H. Salesin: “Environment Matting and Compositing”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH1999), pp.205–214 (1999)
 - 29) M. A. Ruzon and C. Tomasi: “Alpha Estimation in Natural Images”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.18–25 (2000)
 - 30) P. Hillman, J. Hannah and D. Renshaw: “Alpha Channel Estimation in High Resolution Images and Image Sequences”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1, pp.1063–1068 (2001)
 - 31) Y.-Y. Chuang, B. Curless, D. H. Salesin and R. Szeliski: “A Bayesian Approach to Digital Matting”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2, pp.264–271 (2001)
 - 32) J. Sun, J. Jia, C.-K. Tang and H.-Y. Shum: “Poisson Matting”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH2004), pp.315–321 (2004)
 - 33) C. Rother, V. Kolmogorov and A. Blake: “GrabCut” – Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH2004), pp.309–314 (2004)
 - 34) A. R. Smith and J. F. Blinn: “Blue Screen Matting”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH1996), pp.259–268 (1996)
 - 35) A. Yamashita, T. Kaneko, S. Matsushita and K. T. Miura: “Region Extraction with Chromakey Using Stripe Backgrounds”, IEICE Transactions on Information and Systems, 87-D, 1, pp.66–73 (2004)
 - 36) 荒木 昭一, 横矢 直和, 岩佐 英彦, 竹村 治雄: “複数物体の抽出を目的とした交差判定により分裂する動的輪郭モデル”, 信学論, J79-D-II, 10, pp.1704–1711 (1996)
 - 37) 縣 弘樹, 山下 淳, 金子 透: “動的輪郭モデルを用いたストライプ状クロマキー”, 画像の認識・理解シンポジウム 2005 (MIRU2005) 論文集, pp.1185–1192 (2005)
 - 38) M. Tamir: “The Orad Virtual Set”, Int. Broadcast Eng., pp.16–18 (1996)
 - 39) C. Matsunaga, Y. Kanazawa and K. Kanatani: “Optimal Grid Pattern for Automated Camera Calibration Using Cross Ratio”, IEICE Transactions on Fundamentals, E83-A, 10, pp.1921–1928 (2000)
 - 40) 縣 弘樹, 山下 淳, 金子 透: “市松模様の背景を用いたクロマキー”, 画像の認識・理解シンポジウム 2006 (MIRU2006) 論文集, pp.400–405 (2006)
 - 41) I. Sato, Y. Sato and K. Ikeuchi: “Illumination from Shadows”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25, 3, pp.290–300 (2003)



やました あつし
山下 淳 1996 年 3 月東京大学工学部精密機械工学科卒業, 1998 年 3 月同大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了, 2001 年 3 月同博士課程修了. 同年 4 月静岡大学工学部機械工学科助手. 2006 年 11 月よりカリフォルニア工科大学客員研究員. 画像処理, コンピュータビジョン, ロボットの知能化などに関する研究に従事. 博士 (工学). 正会員.



あがた ひろき
縣 弘樹 2004 年 3 月静岡大学工学部機械工学科卒業. 同年 4 月静岡大学大学院理工学研究科修士課程入学, 現在に至る. 画像合成に関する研究に従事.



かね こ とおる
金子 透 1974 年 3 月東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了. 同年 4 月日本電信電話公社 (現 NTT) 入社. 1997 年 4 月静岡大学工学部機械工学科教授. 画像処理, ロボットビジョンの研究に従事. 工学博士. 正会員.