

ボトムアップ制御とトップダウン制御の 組合わせによる領域解析†

大田 友一†† 金出 武雄†† 坂井 利之††

屋内外の風景のように比較的複雑なシーンを領域分割する場合、明るさ等の情報のみにより正しい分割結果を得るのは困難である。そこで、意味情報を領域分割過程に導入したセマンティック領域分割法と呼ばれる手法が開発されてきた。しかし、この方法は意味情報を領域分割のボトムアップな制御構造の枠組内に組込んでいた。その結果、建物のように明確な構造を持つ物体や、建物の窓などの細部構造の取扱いが困難であった。本研究では、意味情報の活用にトップダウンな制御構造を導入し、ボトムアップ処理、トップダウン処理の各々の長所を組合わせた手法を開発することにより、細部構造を持つ複雑なシーンを領域法により解析することを可能とした。

入力シーンは準備的に領域分割され記号化記述される。次にボトムアップ処理によりシーンの概略の解釈としてプランを作成する。トップダウン解析部はプロダクションシステムとして構成され、プランを参照しつつ解析をすすめる。空、木、建物、道路、および、建物の細部構造として窓、道路の細部構造として自動車を含む屋外風景写真を例題として処理し、本研究における手法の有効性を示した。

1. ま え が き

計算機により屋内外の風景写真など一般のシーンの解析を行う場合、領域解析による手法が用いられることが多い。領域解析法では、線抽出による解析手法に比べて、面の持つ性質の取扱いが容易であることと、シーンの大局的な構造がつかみやすい利点があるためである。領域解析法は、入力画像を対象物体に対応する領域に分割し、得られた各領域に解釈を割付ける。領域分割の際の分割の良否の評価基準としては、色・テクスチャなど、領域内の性質の一様性を用いるのが基本的である。しかし、これだけでは意味的に正しい分割は得にくいので、種々の拘束条件を分割に導入する試みが近われてきた。

Brice等¹⁾は、ブロックのシーンを領域成長法 (region growing) により分割する場合、領域間の明るさの類似性を評価する weakness 評価値に加えて、外形のまとまりのよい領域を得ることを目的とした phagocyte 評価値を導入した。しかし、屋外風景のように複雑なシーンの分割には、さらに対象世界に特有な拘束条件の導入が必要である。Yakimovsky等²⁾は、空、道路、草地、木、自動車などを含む道路のシーンを領域成長法により分割したが、その際、領域の色・領域間の位

置関係など、領域の性質、領域間の関係の性質をもとに各領域に対して解釈を割付け、同じ解釈が与えられた領域同志を融合するという、領域分割処理と解釈処理を結合した手法を用いた。これは、シーン中に存在する物体の種類とそれらの関係が限定されていることを拘束条件として利用したことになる。Tenenbaum等³⁾も同様に領域成長法と解釈処理を組合わせることにより屋外風景の分割を行っている。これらの方法は、セマンティック領域分割法と一般に呼ばれている。

建物のように明確な構造を持つ物体を含むシーンを従来のセマンティック領域分割法で処理しようとした場合、建物の窓のように位置的に離れた多くの領域が一定の規則で配列しているものの取扱いや、互いに隣接する複数の領域にまたがった形状評価が非常に困難であることに気付く。その理由は、セマンティック領域分割法では、個々の領域を順々に調べていき確実そうなものから意味を割当てるという領域成長法のボトムアップな性格をそのまま引継いだ制御を行っているので、意味情報が領域間の境界のコントラストなどの局所的な画像的情報と同じレベルで分割処理過程に取込まれているからである。その結果、分割の正しさの評価法として大局的な最適化を行っているものの評価に使える情報は局所的なものに限定されてしまう。このような問題点はボトムアップ的手法に起因するものであり、その解決にはモデルに導かれたトップダウンな処理方式を導入し、シーンの持つ大局的構造や細部構造を考慮した処理や位置的に離れた部分に関

† A Region Analyzer Using Bottom-up and Top-down Control by YU-ICHI OHTA, TAKEO KANADE, and TOSHIYUKI SAKAI (Department of Information Science, Kyoto University).

†† 京都大学工学部情報工学科

連づけて取扱う処理を可能にする必要がある。しかし、シーンの構造がある程度つかめていないとトップダウン制御による解析は非効率で一般性を欠く。ボトムアップとトップダウンの長所を組合わせた手法の開発が重要である。

我々は、空、木、建物、道路、建物の細部構造として窓、道路の細部構造として自動車を含む屋外風景写真を、ボトムアップ制御とトップダウン制御を組合わせた領域法により解析することを試みた。入力シーンは、まず準備的に領域分割し記号化記述する。次に、入力シーンの概略の解釈としてプランをボトムアップ処理により作成する。プランは、トップダウン解析部においてどの知識をシーン中のどの部分に適用すべきかを示すガイドの役割をする。トップダウン解析部はプロダクションシステム⁴⁾として構成する。プロダクション規則により記述された知識を用いて領域分割により得られたすべての領域に対して解釈を行い、その進行に従って解析結果の記述を構築する。

2. 解析処理の概要

2.1 ボトムアップ解析とトップダウン解析の結合

ボトムアップ制御による画像解析では、まず入力画像データから種々の特徴を抽出し、その特徴とモデルを照合することにより解析を進める。これに対し、トップダウン制御による解析では、モデルに基づいて解析結果を予測し、その検証に必要な特徴を入力画像中から抽出しようとする。したがって、入力画像の構造について予測が可能な場合には、トップダウン解析法は信頼性が高く効率よい処理を行えるが、そうでない場合には能率が悪く信頼性も低い。ボトムアップ解析法は一般に能率はよくないが、入力データを出発点として解析を進めるので、極端に誤った結果を出すことは少ない。以上の点から、我々は、ボトムアップ解析により入力画像の概略の構造について情報を得、トップダウン解析が有効に動作しうる環境を整えた上でトップダウン解析を行うようにすれば、両方法の欠点を補い合うことができると考えた。

図1は我々が作成した屋外風景写真解析システムにおける処理の概要を示す。点線で囲んだ部分がボトムアップ的に処理される部分である。入力カラー画像を、まず色の情報だけに基づいて準備的に領域分割する。これを初期領域分割と呼ぶ。この段階では、原画像が含む情報を細部まで充分に抽出できるように過分割の状態にまで分割をすすめ、意味的には分割されるべき

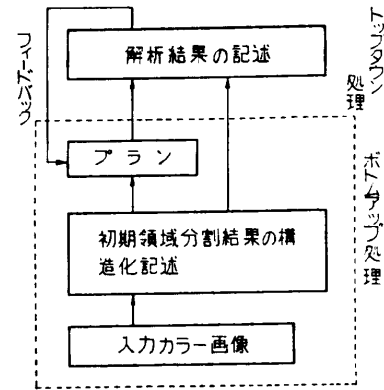


図1 解析処理の概要

Fig. 1 Outline of analysis process.

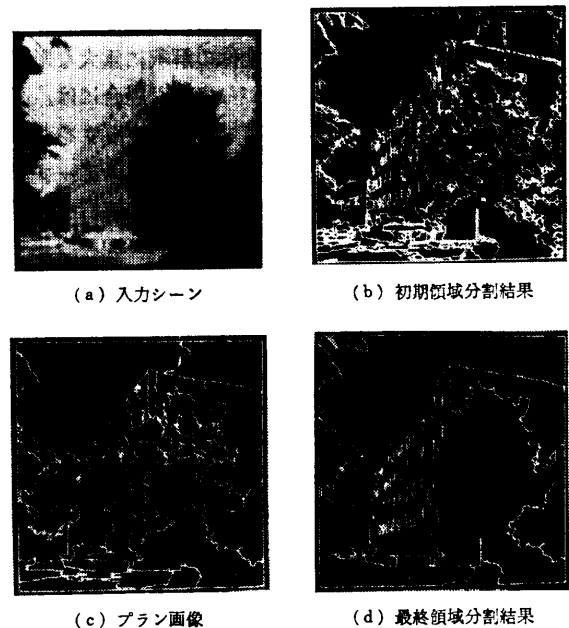


図2 屋外風景写真の解析例

Fig. 2 Results of outdoor scene analysis.

領域が分割されずに残ることがないようにしておく。図2(a)のカラー画像の初期領域分割結果を図2(b)に示す。領域間の境界が表示してある。初期領域分割の結果は、領域、境界、頂点、穴、および境界にあてはめた直線分を記述要素として記号化して記述しておく。これにより、画像処理関数の高速な評価を可能とし、試行錯誤の多い高レベルの解析処理が効率化される。(初期領域分割処理、記号記述化処理の詳細は文献5)参照)。

ボトムアップ解析とトップダウン解析の接点として、我々は、与えられたシーンの概略の解釈である「プラン」をボトムアップ解析により作成した。ここで概

略の解釈とは、初期領域分割結果中の大面積の領域に対して、いくつかの解釈の可能性とその確からしさの評価値を与えたものである。比較的数量少ない大領域のみを対象とすることにより、ボトムアップ解析の欠点である能率の悪さは、さほど問題にならない。プランは、トップダウン解析部においてどの知識をシーン中のどの部分に適用すべきかのガイドの役割をする。

トップダウン解析部では、ボトムアップ解析により得られたプランを参照しつつシーン中の大きな面積の領域に対する解釈の確定を行う。また、そのコンテキストの下で小面積の領域を解釈しシーンの細部構造の抽出を行う。大局的な情報をプランから得ることにより、トップダウン解析の効率や信頼性の向上が期待できる。トップダウン解析においても、例えばシーンの地平線の位置のようにシーン全体の解釈に重大な影響をおよぼす可能性のある決定がなされた場合には、必要に応じてボトムアップ解析にフィードバックをかけてプランを再評価する。このように、ボトムアップ解析とトップダウン解析が共同してシーンの解析を遂行する。

2.2 ボトムアップ解析によるプランの作成

初期領域分割結果中で大きな面積を持つ領域の多くは、シーン中に存在する主要な物体の一部に対応していると考えてよく、比較的安定に抽出される。この大面積の領域をキー領域と呼ぶ。領域の性質および領域間の関係性を評価して、各キー領域に対して例えば(sky=0.5, building=0.2, tree=0.2, road=0.1)のように解釈とその確からしさを与えることにより、入力シーンの大まかな構造を把握できる。キー領域間の関係性を評価する場合キー領域以外の小領域の存在はかえって障害になるので、あらかじめ、すべての小領域をキー領域のいずれかに強制融合した画像（プラン画像と呼ぶ）を生成し、プランはプラン画像上の各領域に解釈を与えることにより作成する。この融合操作には意味情報は用いず、小領域が2つ以上のキー領域と接している場合には各領域の色の類似度、融合後の外形のまとまりの良さを評価して融合相手を決定する。図2(b)に対するプラン画像を図2(c)に示す。

2.3 プロダクションシステムによるトップダウン解析

トップダウン解析部はプロダクションシステムとして構成する。図3はその概念図である。プロダクションシステムは、条件(condition)部と実行(action)部の対であるプロダクション規則の集りとデータベース

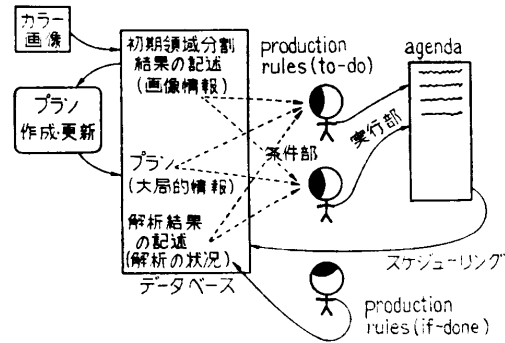


図3 プロダクションシステム概念図

Fig. 3 Schematic diagram of the production system.

からなる。データベースには①記号化記述された初期領域分割結果、②プラン、③各時点における解析状況が蓄えられている。プロダクション規則には、to-do型とif-done型の2種の規則がある。これらはそれぞれPLANNER⁶⁾におけるconsequent型、antecedent型の定理に対応する。to-do型の規則は、その条件部に記述されている述語でデータベースの状態を調べ、条件が満たされれば実行部を評価してデータベース中の記述の追加、変更を行う。一般に、ある時点で同時に実行可能な規則は複数個あるので、それらは、一旦、agendaと呼ぶ表に登録し実行順序をスケジュールリングする。if-done型の規則は、特定のto-do型規則が実行されたとき起動される。以上のように、プロダクションシステムは非階層的(heterarchical)な制御構造を持ち、ボトムアップ解析における結果を手がかりとしてトップダウン解析を行う場合に、入力シーンの確かそうな部分から順に解析をすすめるデータ主導型の制御が行える利点がある。

一般に、トップダウン制御により解析処理を進める場合、各時点での解析状況に応じて次段の解析を制御していく必要がある。このためには、解析プログラム自身が解析処理の進行状況を把握できる必要があり、解析結果の記述法は重要である。図4は、我々のシステムにおける解析結果の記述の構造を示す。scene, object, region, sub-region, patchの各レベルに属する記述要素により構成される。patchは初期領域分割により得られた領域に対応し、解析処理における最小取扱い単位である。sceneは入力シーン全体、objectはシーン中で見出された物体に対応する。regionはobjectを構成する主たる部品に対応し、同一の意味を与えられたpatchを融合したものである。sub-regionはobjectの副次的な部品に対応する。これらの記述

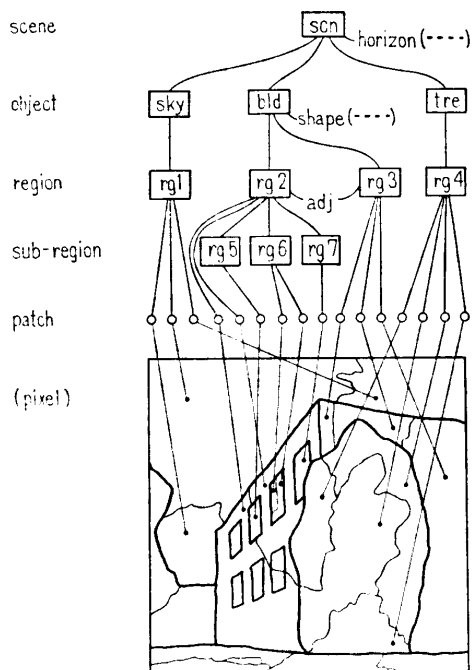


図 4 解析結果の記述の構造

Fig. 4 Structure of the scene description.

要素はすべて part-of の関係により階層構造を形成する。物体間に存在する adjacent や occluding などの関係も対応する region 間に記述する。解析処理に必要な画像データはすべてこの記述に含まれており、特徴抽出、領域の融合などの計算はこの記述上で実行される。図 2 (a) の入力シーンに対して、最終的に得られた解析結果の記述における region と sub-region の輪郭を表示したのが図 2 (d) である。(図 2 (b), (c), (d) の画像は、あくまで表示のために記述から生成したものであり、解析処理が、2次元行列として表現されたこれらの画像上で行われるわけではない。)

3. プラン作成のためのモデル表現と制御構造

3.1 モデル表現

解析対象である屋外風景についての知識を記述したモデルは、図 5 に示すようなセマンティックネット状に組織化して表現されている。ネットワーク中の各ノードは knowledge block (KB) と呼ばれ、対象とする世界の中の一つの事象に対応し、それに関する知識を保持している。例えば、「空」「木」などの物体、「コンクリート」などの物質、「青」「明るい」などの性質、「直線境界」などの関係に対応する KB がある。各物体および物質に対応する領域が満たすべき性質や、あ

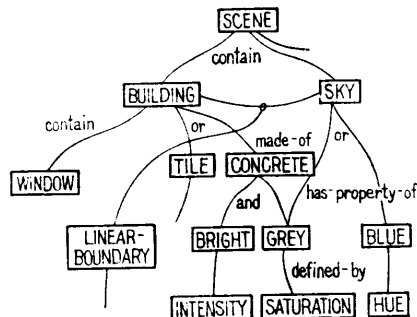


図 5 知識表現のためのセマンティックネット
Fig. 5 Semantic network for knowledge representation.

る物体に対応する領域と他の物体に対応する領域の間で満たされるべき関係は、規則のかたちでそれぞれの物体、物質のKB中に記述する。規則の書式を次に示す。

性質: [(type fuzzy-predicate weight) (var-list)]
関係: [(type fuzzy-predicate weight FOR label) (var-list)]

各規則が表現する性質や関係は fuzzy-predicate 部分に LISP 的な書式によりファジイ述語として記述する。var-list は、ファジイ述語中の外部変数のリストであり、各変数は制御プログラムにより、規則を適用すべき領域に bind される。ファジイ述語は、var-list 中の変数に bind された領域の性質または領域間の関係を評価し、0~1 のファジイ真理値を与える。weight は (ω_1, ω_2) のごとく 2 つの数値のペアであり、その規則が表現する性質 A の重要さを示す。 ω_1 はある領域が性質 A を満たす先験確率 $P[A]$ 、 ω_2 はある領域が物体 X である場合に性質 A が満たされる条件付確率 $P[A|X]$ に対応する。type は GEN (General) と STR (STeReotyped) の 2 種がある。GEN 型の規則は「空は青い」のような一般的な知識を表わし、STR 型の規則は「画面の下辺に接する領域は道路の可能性が高い」(接しなくても道路でないとはいえない) のような一つの典型例を表わしている。これら 2 つの type の知識は必ずしも本質的に異なるものではないが、規則の作成、weight 値の決定には 2 つを区別した方が便利である。label は関係規則において、その関係が成立すべき相手の物体を表わす。

規則の記述例を次に示す。

「空」の KB 中の性質規則の例

知識: 「空 (SK) は青または灰色である」

規則: [(GEN (OR (*BLUE *SK) (*GREY *SK)) (1 . 0.2)) (*SK)]

「建物」の KB 中の関係規則の例

知識: 「建物 (BL) は空(SK) と直線をよく含んだ境界で接し, かつ, 建物は空より上側には位置しない」

規則: [(GEN (AND (*LINEAR *BL *SK)
(NOT (POSITION UP *BL *SK)))
(1 . 0.5) FOR SKY) (*BL *SK)]

3.2 プランの評価

プランは, プラン画像中の各領域 Q_i に対してモデルに含まれる主要な物体のラベル X_m を割付け, その正確度 C_{im} を評価したものである. したがって, プランを評価するというのは各ラベルの正確度を評価することである. ラベルの正確度は ① 先験確率, ② 性質規則の評価値, ③ 関係規則の評価値の3種の値を順に用いて評価する. 先験確率は, 各ラベルごとにモデル中に記述されており各ラベルの正確度評価の際に初期値として用いる((2)式参照). 関係規則を最後に用いるのは, 関係进行评估する場合, 相手領域のラベルがある程度定まっている必要があるためである.

○評価値更新係数の算出

条件付確率に関する Bayes の定理によれば, 性質 A を観測後に, ある領域がラベル X_m を持つ事後確率 $P[X_m|A]$ と, 先験確率 $P[X_m]$ の間には (1) 式の関係がある.

$$P[X_m|A] = P[X_m] \cdot P[A|X_m] / P[A] \quad (1)$$

ここで $P[A]$ は性質 A の先験確率, $P[A|X_m]$ はラベル X_m を持つ領域が性質 A を満たす条件付確率である. したがって, ある領域 Q_i について, 性質規則 R_{mk} [(type fuzzy-predicate-A weight) (var-list)] を評価し fuzzy-predicate-A が満足された場合, ラベル X_m の正確度の評価値は $P[A|X_m]/P[A]$ 倍してやればよい. $P[A|X_m]$, $P[A]$ は規則 R_{mk} の weight として与えられている. 領域 Q_i に対する, 規則 R_{mk} , すなわち, fuzzy-predicate-A の評価値を t_{imk} とすれば, t_{imk} は一般に $0 \sim 1$ の値をとる. したがって, ラベルの正確度の更新には, $P[A|X_m]$, $P[A]$ と t_{imk} から算出した評価値更新係数 r_{imk} を用い, t_{imk} の値に応じて更新の割合を加減する. 図6に t_{imk} からの r_{imk} の算出法を示す. t_{imk} が 0.5 で性質 A の有無についてどちらともいえない場合, および, STR 型の規則で $t_{imk} < 0.5$ (性質 A の存在について否定的) の場合には $r_{imk} = 1$ とし評価値を変化させないようにする.

○性質規則による評価値の更新

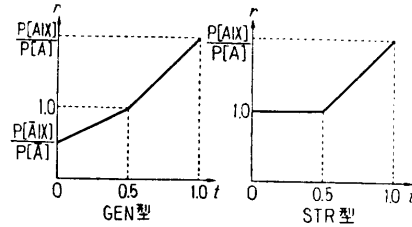


図6 更新係数 r とファジィ真理値 t の関係

Fig. 6 Revision factor r vs. fuzzy truth value t .

ラベル X_m を持つ領域が満たすべき性質を記述した規則は, 一般に複数個 (K_m 個) ある. ラベル X_m の正確度の評価値は, これらの規則を評価して得られた評価更新係数 r_{imk} ($k=1 \sim K_m$) を順々にかけあわせて更新する. したがって, 領域 Q_i の, ラベル X_m に対する, 性質規則のみによる正確度の評価値 $C_{im}^{(0)}$ は (2), (3) 式で計算される.

$$C_{im}^{(0)} = P[X_m] \cdot \prod_{k=1}^{K_m} r_{imk} \quad (2)$$

各領域について, すべてのラベルの評価値の総和が 1 となるように正規化しておく.

$$C_{im}^{(0)} = c_{im}^{(0)} / \sum_{m=1}^M c_{im}^{(0)} \quad (3)$$

○関係規則による評価値の更新

ラベル X_m の領域とラベル X_n の領域の間でなりたつべき関係を記述した規則 R_{mjk} が領域 i と領域 j の間でファジィ真理値 t_{imjk} を持つとき, 領域 i のラベル X_m についての評価値 C_{im} は, 性質の規則の場合と同様に, R_{mjk} の weight と t_{imjk} から算出される更新係数 r_{imjk} 倍すればよい. しかし, 領域 j のラベル X_n に対する評価値 C_{jn} は $0 \sim 1$ の値をとるが, $C_{jn} = 0$ の場合には関係の評価自体無意味である. したがって, r_{imjk} を C_{jn} で重みづけした係数により C_{im} の更新を行う. この操作を, 領域 i とプラン画像中の他のすべての領域との対について, すべてのラベル X_n について, ラベル X_m とラベル X_n の関係を表現したすべての規則について行えば, C_{im} は (4) 式で計算される.

$$C_{im} = C_{im}^{(0)} \cdot \prod_{j=1}^J \prod_{n=1}^N \prod_{k=1}^{K_{mn}} \{(r_{imjnk} - 1) \cdot C_{jn} + 1\} \quad (4)$$

(J : プラン画像中の領域数, N : ラベル数, K_{mn} : ラベル X_m とラベル X_n の間の関係規則の数)

(4)式右辺の C_{jn} も関係規則の評価により更新されるので, C_{im} は $J \times N$ 元連立方程式の解となるが, 正確に解くのは困難である. 我々は, 緩和法の手法に

より (5) 式の操作を L 回繰返して C_{im} の近似値 $C_{im}^{(L)}$ を漸近的に求めた。

$$C_{im}^{(l)} = C_{im}^{(0)} \cdot \prod_{j=1}^J \prod_{n=1}^N \prod_{k=1}^{K_{mn}} \{(r_{imjnk} - 1) \cdot C_{jn}^{(l-1)} + 1\} \quad (l=1 \sim L) \quad (5)$$

$C_{im}^{(0)}$ が十分に小さい場合、および、 $C_{jn}^{(l-1)}$ が小さい場合には、関係規則を評価し r_{imjnk} を求めても更新の効果は小さいので、 $C_{im}^{(0)} \geq 0.1$ かつ $C_{jn}^{(l-1)} \geq 0.5$ の場合にのみ r_{imjnk} を求めて C_{im} の更新を行うことにし、計算量の軽減を図った。この結果、実際に評価される規則数は比較的少なく、繰返し回数 L は 2~3 回で充分であった。

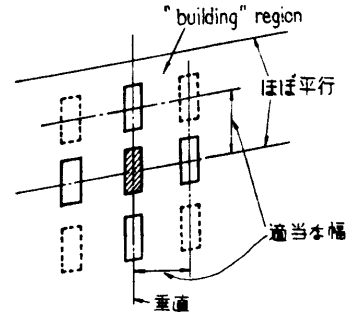
4. 領域解析のためのプロダクションシステム

4.1 プロダクション規則の記述法

画像解析にプロダクションシステムを適用する場合、個々のプロダクション規則が担当する解析処理の単位が問題となる。我々は、領域成長法による解析処理の基本処理単位である、「1つの領域に注目し、それにラベルを割付けて解析結果の記述中に組み込む」という操作を、各規則の表現単位とした。そして「領域に注目する」「ラベルを割付ける」「解析結果の記述中へ組み込む」という、データベースに対する基本操作を定式化して、その組合わせでプロダクション規則を記述した。この結果、個々の規則が単純になり、かつ、それらのデータベースへのアクセス法が統一されているので知識の追加・変更が容易になるという利点が得られた。反面、1つ1つの領域を処理の単位とすることにより、解析がミクロ的になり大局的な拘束条件の導入が困難となる。この点は、①プランを作成してデータベース中におき、各規則が参照できるようにしたこと、②ある性質を満たす領域の組合せをデータベース中より探索する関数を用意し⁵⁾、建物の窓、道路上の自動車のように複数個の領域が一定の拘束を満たすことにより形成される物体の抽出を可能としたことにより解決した。

プロダクション規則の一例として、SKY を発見し、その記述を作成するための規則を次に示す。

```
[(ACT
  (AND (PROBABLY SKY *RGN) .....条件部
        (NOTFOUND SKY))
  (THEN (CONCLUDE P-LABEL SKY) ...実行部
        (CONCLUDE O-CREATE)
```



(a) 建物の窓の配置規則

```
[(ACT
  (IF (*WINDOW-LIKE *RGN) .....条件部
    (THEN (GET-SET *PLSET (PLAN *MRGN) PATCHES)
           (AND (ALL-FETCH *WLIKE *PLSET
                    (AND (IS (LABEL *WLIKE) NIL)
                          (*WINDOW-LIKE *WLIKE)))
                (ALL-FETCH *WIND *WLIKE
                          (THERE-IS *WK *WLIKE
                                    (*W-RELATION *WIND *WK))))))
    (THEN (CONCLUDE P-LABEL B-WINDOW) .....実行部
          (FOR-EACH *WIND (MUST-BE *WIND
                                   P-LABEL B-WINDOW))
          (SCORE-IS (ADD 2100 (NUMBER *WIND))))))
  (*RGN *MRGN)] .....変数リスト
```

(b) プロダクション規則

図 7 建物の窓を抽出するプロダクション規則

Fig. 7 A production rule for extracting windows.

```
(SCORE-IS (ADD 4000 (CONF-VAL
  *RGN)))) (*RGN)]
```

先頭の ACT は、この規則がプロダクション規則である事を示し、3.1 に示したプラン作成に使用する規則と区別する。条件部は述語 PROBABLY と述語 NOTFOUND の論理積である。述語 PROBABLY は *RGN に bind されている領域がプラン内でラベル SKY に対して一定値以上の評価値を持つかどうか調べる。述語 NOTFOUND は SKY という物体が未発見かどうかを解析結果の記述上で調べる。実行部は、その領域にラベル SKY を割付け解析結果として object の記述を作成すること、スコアはベース値 4000 に領域 *RGN が SKY であることの確からしさをプレミアムとして加えたものとするを記述している。スコアの意味については 4.4 に述べる。

図 7 (a) に示した建物の窓のように、一定の位置関係を満たす複数個の領域が1つの構造を形成している対象を抽出する規則の例を図 7 (b) に示す。この場合には、GET-SET, ALL-FETCH, THERE-IS のように、一定の条件を満たす領域をデータベース中から能動的に探索する関数を用いて規則を記述する。この規則は、建物の細部構造を解析する場面で評価され、

*RGN には調べようとする未解釈の領域(patch)が、*MRGN にはすでに建物の一部として解析結果中に記述されている領域(region)が制御プログラムにより bind されている。条件部は、① *RGN が窓らしい形状であれば、② *MRGN に対応するプラン画像上の領域に融合されているすべての領域を *PLSET に取出し、③ *PLSET 中で未解釈で窓らしい形状をした領域を *WLIKE にとりだし、④ *WLIKE 中で少なくとも1個、図7(a)に示した位置関係を満たす相手を持つ領域をすべて *WIND に取出す事を示す。実行部は、*WIND の各領域に対してラベル B-WINDOW を割付け、この操作のスコアをベース値に *WIND として抽出された領域の数をプレミアムとして加えたものとするを示す。

4.2 シーン解析フェーズとオブジェクト解析フェーズ

プロダクションシステムでは、概念上は個々のプロダクション規則が並列的にデータベースの状況を観測して、自分の起動条件が満たされれば定められた操作を行う。しかし、実際には制御プログラムが順次すべての未解釈領域とプロダクション規則の対についてその実行可能性を調べ、各時点で最も確実そうな操作を選んで実行する。解析途中のある時点で実行可能な規則と領域の対は一般に複数個あり、これらは、一旦、agenda と呼ぶ表に登録されスケジュールされる。agenda は常に最新の状態を保持する必要があるので、制御プログラムは、データベースが変更をうけるごとに agenda を更新しなければならない。このためには、厳密にはすべての規則とすべての未解釈領域の組み合わせについて調べなおす必要があるが、その組み合わせの数は数千にもなり現実的には困難である。

一般に、シーンには局所性とも呼ぶべき性質が存在し、物体の細部構造の決定や物体間の境界の決定などの比較的局所的な解析結果は、そのシーンの他の部分の解釈に対してほとんど影響しない。逆に、シーンの地平線位置、ある物体の存在の検出、オクルージョンなどの物体間の大きな関係のように、その解析結果がシーン全体の構造に影響する場合もある。これら2つの場合は明確に区別して取扱うことができる。我々は、前者の場合に対応してオブジェクト解析フェーズ、後者に対応してシーン解析フェーズを解析プログラムに設けた。シーン解析フェーズでは、初期領域分割結果中で一定値以上の面積を持つ領域(キー領域)のみを解析の対象とし、データベースが変更された時の

agenda の更新をキー領域の解釈が新しく行われた時のみに限定する。オブジェクト解析フェーズでは、特定の物体の近接部分のみを解析の対象とし、agenda の更新もそのモードで解析中の物体の一部として新しく解釈された領域に接する領域に対してのみ行うことにする。プロダクション規則のセットも、シーン解析フェーズで使われるものと各オブジェクト解析フェーズで使われるものにグループ分けすることができ、各フェーズで調べるべき規則の数を削減できる。以上の結果、データベース更新時に再評価すべき規則と領域の対は解析結果に悪影響を及ぼすことなく平均数十程度に削減できた。

4.3 スケジューリング

制御プログラムの基本動作をまとめると、次の3ステップの繰返しである。

① agenda に登録されている実行可能な規則と領域の対から1つ選択し、それを実行してデータベースを更新する。

② もし、①で解釈した領域がキー領域であれば、シーン解析フェーズに入り、knowledge block SCENE 中の規則を起動して未解釈のキー領域を再評価し、agenda を更新する。

③ ①で解釈した領域が属する物体に対するオブジェクト解析フェーズに入り、その物体の knowledge block 中の規則を起動し、その領域に接する未解釈領域を評価し agenda を更新する。

agenda によるスケジュールリングのため、実行可能な規則と領域の対には、それぞれスコアを割付ける。agenda は各時点で最高のスコアを持つ対を選んで実行する。したがって、スコアの決定法が解析処理の誘導のかぎをにぎる。スコアは、各プロダクション規則ごとにその算出法を記述するが、原則としてベース値とプレミアム値の和として定義する。ベース値は、各プロダクション規則に与えられている固定値であり、解析戦略に基づき解析手順の大筋を設定する役割をする。屋外風景写真の解析例では、ベース値は、基本的には次の順序で解析がすすむように設定した。①物体検出、②物体の範囲の拡張、および細部構造の解析、③オクルージョンの処理。プレミアム値は解析処理を正しい解釈の方向へ導く役割をする。その値は、その規則と領域の対が実行可能と判断された状況におけるプロダクション規則の条件部の満足度であり、具体的には、条件部の述語のファジィ真値、プラン上での各ラベルの正確度の評価値などを用いる。

結局、解析処理はベース値で設定された大筋に従い、プレミアム値により正しい解釈の方向へ誘導されていくことになる。

5. 処理結果

前節までに述べた手法により、大学構内の屋外風景写真の解析を行った。モデルには、空、建物、木、道路、そして建物の細部構造として窓、道路の細部構造として自動車を与えた。図2(a)の入力シーンに対する初期領域分割結果が図2(b)である。領域間の境界を表示してある。図2(c)は図2(b)中の大領域に小さな領域を融合して作成したプラン画像であり、その中の領域は入力シーン内の主要な構造を反映しているといえる。図8に解析途中で得られたプランの評価結果を示す。図8(a)は解析のはじめにおいて性質規則のみにより評価した結果であり、プラン画像中の各領域に与えられたラベル SKY (左上), TREE (右上), BUILDING (左下), ROAD (右下) に対する評価値を明度で表示している。図8(b)は関係規則を用いて図8(a)を更新した結果であり、図8(a)では建物の手前の壁面(入力シーンでは灰色で明度が高い)がSKYとして高い評価値を得ていたのが修正されている。図8(c)は、トップダウン解析部においてシーンの地平線が求めた後、プランを再評価した結果である。図8(c)中には地平線の位置が表示してある。図8(d)は同じくトップダウン処理により求められた建物の外形を表示したものである。図2(d)は最終的に得られた分割結果であり、解析処理により構築された図4の記述における region と sub-region の輪郭を表示したものである。図9(a)は道路上に自動車を含む入力シーンの例であり、図9(b)はその解析の最終結果である。

6. むすび

本稿では、屋外風景写真の解析システムを例に、細部構造を含んだ比較的複雑なシーンの領域法による解析システムについて述べた。本研究で得られた成果は次の点である。

- ① 本来ボトムアップな性格を持つ領域成長法にトップダウン制御を導入することにより、従来、領域成長法では困難だった建物の窓などのシーン中の細部構造の解析が容易になった。
- ② ボトムアップ解析によるプランの作成と、プロダクションシステムによるトップダウン解析を組合わ

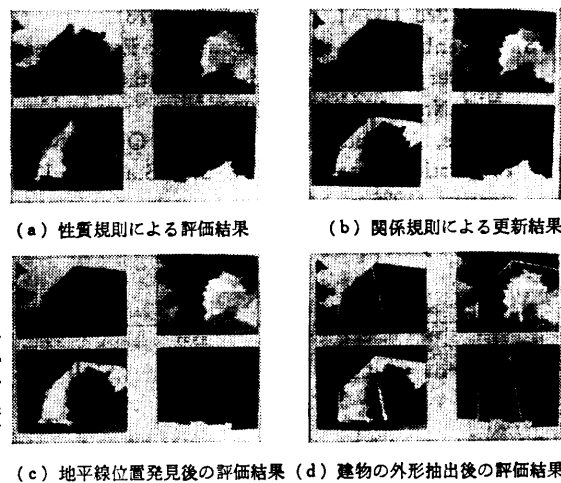


図8 プランの評価結果

Fig. 8 Results of plan evaluation.

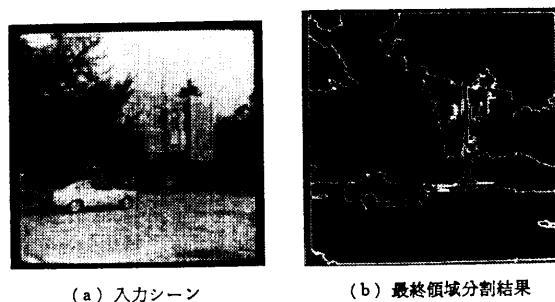


図9 他のシーンに対する解析例

Fig. 9 Final result for another scene.

せることにより、入力シーンの確かそうな部分から解析をすすめることができ、効率よく信頼性の高い解析法を実現した。

③ 領域成長法の持つ「領域を選び、ラベルを割付け、記述を作成する」という明解な制御構造を、そのままプロダクションシステムの基本制御に持込むことにより、簡明な知識表現法を実現した。

④ 画像解析にプロダクションシステムを導入し、モデル記述、計算量、スケジューリングなど、いくつかの問題点およびその解法を明らかにした。特に、シーンの持つ局所性に基づき解析過程に2つのフェーズを設け、それが計算量の軽減に非常に有効であることを示した。

参考文献

- 1) Brice, C. and Fennema, C.: Scene Analysis Using Regions, Artificial Intelligence, Vol. 1, pp. 205-226 (1970).
- 2) Yakimovsky, Y. and Feldman, J.: A Semantics-based Decision Theory Region Analyzer,

- Proc. 3rd IJCAI, pp. 580-583 (1973).
- 3) Tenenbaum, J. and Barrow, H.: Experiments in Interpretation-Guided Segmentation, Technical Note 123, SRI (1976).
- 4) Davis, R. and King, J.: An Overview of Production Systems, AIM-271, Stanford University (1975).
- 5) 大田, 金出, 坂井: 領域分割処理によるカラー画像情報の構造化, 情報処理, Vol. 19, No. 12, pp. 1130-1136 (1978).
- 6) Hewitt C.: PLANNER, AI memo No. 168, MIT (1968).

(昭和 54 年 7 月 18 日受付)

(昭和 54 年 10 月 25 日採録)