対話型作業環境同定のための知識完備化メカニズム[†]

亀 島 鉦 二*・青 木 利 幸*・渡 部 優理子*

Knowledge Completion Mechanism for Interactive Object Identification

Kohji KAMEJIMA*, Toshiyuki AOKI* and Yuriko C. WATANABE*

An interactive identification scheme is presented for remotely located objects. In the identification process, a multi-modal description is generated based on operator's instruction of the type and the image of object. The a priori information, a set of symbolic descriptions of object knowledge, is installed in the computer system on which the scheme is implemented. Supported by this a priori knowledge, the operator specifies the object in the observed image captured by monocular TV camera. The instruction is matched with observed imagery to complete the as-is object description. Through a series of experiments, the scheme has been demonstrated to be applicable to the identification of extended classes of practical scene.

Key Words: knowledge completion, object identification, human-computer interaction

1. はじめに

遠隔状態で作業対象の種類や位置を知りたい場合が多い。特に、大規模な構造物を建設したり保全したりする場合には、作業に先立って、主要な物体の配置を把握した上で、組み立て手順を計画したり、作業機を操作したりしなければならない^{7,9)}。このような作業環境の同定に関しては、従来から、大きく分けて二つの方向の研究がなされている。一つは、計算機に測量を実行させようとするアプローチである¹⁷⁾。この場合には、映像をモノとして認識する人工知能が最大の課題である。ほかの一つは3次元ディスプレイなどを用いてヒトに遠隔測量を行わせようとするアプローチである¹⁶⁾。この場合には、ヒトの感覚に合致した3次元情報の提示が最大のポイントとなる。

ただし、いずれのアプローチの場合でも、測量自体は、本質的に点単位で行われていることに注意を要する。すなわち、人工知能による場合でも、ヒトの操作による場

合でも、測量結果をモノの大きさや位置に対応付けるためには、3次元幾何量を集積し、対象に結びつける“作業”が必要である⁹⁾。したがって、作業対象の同定に当たっては、測量による3次元幾何量の獲得プロセスと対象記述の生成プロセスの融合が本質的な役割を果たすことになる。

ただし、“どのような幾何情報を獲得すべきか”は、対象自体ではなく、対象に対する働きかけ方によって定まる。さらに、対象に対する働きかけは、作業の進行にしたがってダイナミックに変化する⁹⁾。このような文脈依存性のもとでは、対象記述の範囲を事前に確定することは実際的ではない。実際、実環境で動作するシステムは、しばしば“調整による対象知識の補充”を必要とする¹²⁾。したがって、遠隔測量を行う際には、特定様式の計測データを自動的に作りだすシステムよりも、むしろ、あたかもヒトがその場へ出かけて測量しているように目的に応じて知識を補充してゆくシステムが重要といえる。

そこで、人間-計算機協調のもとで測量-記述プロセスを統合し、対象知識を補充する情報処理メカニズムを開発した。本メカニズムのもとでは、人間は物体の種類および概略位置の決定を分担し、計算機は物体モデルの検索、位置・姿勢の決定および対象記述の生成を分担する。

[†] 第4回ロボティクス自動化システムシンポジウムで発表(1993・3)

* (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町502

* Mechanical Engineering Research Laboratory,
Hitachi, Ltd., Tsuchiura
(Received March 18, 1993)
(Revised February 2, 1994)

2. 対象知識の不完全性と完備化

作業環境は、作業地点ごとに物体を作業対象として計測し、その配置状況を記述することにより同定される。いい換えれば、対象に関する情報は作業中に検索されることになる。検索を効率よく行うためには、対象情報を有限個の知識(対象知識と呼ぶ)として事前に離散化しておかなければならない。一方、現実の環境と対応付けるためには、作業中に記述を連続的に適合させなければならない。この有限性・連続性の対立解消が、測量-記述プロセス統合に当たった必然的要請である。さて、物体の配置状況は、3次元輪郭形状などの物体固有の情報および物体の位置・姿勢情報により規定される⁴⁾。ただし、物体固有情報は限定された範囲で事前に収集可能であり、位置・姿勢情報は観測を待って取得可能である。この点に着目して、本章では、有限性に起因する事前知識の限界(不完全性と呼ぶ)と作業中の観測による連続適合(Palm¹⁵⁾にならって完備化と呼ぶ)の可能性を明らかにする。

2.1 事前知識の不完全性

構造物は、比較的単純な形状をもつ要素の組合せで構成されるのが通例である。したがって、測量時には、“物体を見ながら”対象記述を合成することが实际的である。また、物体を観察するときには、まず全体を眺め、次第に観察範囲を狭めながら詳細に調べるのが自然であろう。混乱を避けるためには、注目対象の記述にはスコップ外の対象の記述を含めないでおくほうが扱いやすい。このような意図的な省略を伴う観察の流れに対処するためには、まず、対象知識を要素ごとに記号化し、ついで、観察スコップの変更に対応して要素を合成する計算規則を導入すればよい。

この観点から、知識完備化メカニズムでは、要素間の相互干渉を無視して対象を記号的に合成する計算規則を導入する。具体的には、合成をつぎの形式的演算により表現する：

$$\text{構造物} \Leftrightarrow \text{要素1} \oplus \text{要素2} \oplus \text{要素3} \oplus \quad (1.a)$$

本規則では、対象を構造物と要素の2階層で表現する。ただし、この構造物-要素の関係は生成的である。すなわち、(1.a)式の構造物はほかの構造物の要素になることができ、また、要素1、要素2、要素3、…はほかの要素からなる構造物となりうる。さらに、(1.a)式では、要素1、要素2、要素3、…は、構造物との関係のみにより拘束される。すなわち、要素1と構造物の関係は、ほかの要素、要素2、要素3、…に影響されない。したがって、(1.a)式の右边で、計算順序は意味をもたない。このよう

な2階層性ならびに要素間の独立性が、集合における直和演算と類似性を示すことを考慮して、以下、(1.a)式の型の計算規則を“直和の論理”と呼ぶ。直和の論理にもとづく対象の記述例をFig.1に示す。ここでは、対象を、capおよびcoverならびにKnobの2水準の構造物として生成している。ただし、Fig.1の左側は実世界での合成状況を、また右側は、記号的合成状況を表わしている。

直和の論理にもとづく対象の記述では、要素の位置関係は構造物内での相対配置として表現することになる。このような位置表現は(1.a)式右边の各要素の座標系を、左辺の構造物座標系に関して変換することにはほかならない。いい換えれば、(1.a)式の計算規則のもとで各要素の位置情報を統合する計算手順を合成することができ。実際、Fig.1の演算記号 $\oplus$ を“座標変換行列の合成”

に対応づければよい。たとえば、Fig.1の場合には、座標系記号(対象名と同一視している)cap, cover, knob, disk, holeに関する計算を行えばよい。このような記号操作は、環境内での位置表現^{4),5)}を利用して記述可能である。また、このような合成規則は、コンピュータ・グラフィックスでの物体定義¹³⁾にも適合している。このように、幾何学的情報の生成規則をも含んだ合成計算規則をAlgebra of Objectsと呼ぶ。

このようなAlgebra of Objectsにもとづく対象記述は記号的計算可能である。すなわち、構造物(Fig.1の上側)と要素集合(同下側)は等価である。また、記号的合成規則(同右側)を、実世界での合成状況(同左側)の範囲内で決定できるという意味で、投影可能である。ただし、このようなAlgebra of Objectsにもとづく対象記述は、対象記述が文脈依存を示す場合には、不完全である。すなわち、記号的合成規則から実世界での合成状況を決定するという逆演算は成り立たない。なぜならば、しばしば構成要素の省略が行われるからである。実際、Fig.1の分解は一意的ではない。

2.2 観測による完備化

作業対象に対する測量は、空間の点と対象物体の点に対応付けることにより完了する。したがって、測量計測

Fig.1 Algebra of objects

データの解釈に当たっては、物体の見え方を予測しなければならない。上記 Algebra of Objects は、この予測の記号的枠組みを与える。ただし、物体の位置・姿勢は環境の物理的拘束を受け、連続的に変化する。このような連続自由度を記号表現と対応付けるためには、位置・姿勢を分節化しなければならない。本メカニズムでは、測量作業の文脈依存性を考慮して、この分節化を観測を通して行う。すなわち、記号的に導出される対象物体の位置・姿勢を事前情報とし、計測プロセスを通して実環境に適合させることにより対象記述を補充する方法をとる。

さて、物体は、方向によって特有の見え方をもつ。したがって、見え方をイメージするときには、まず大まかな姿勢を思い浮かべ、次第に方向を調節するのが自然であろう。このことに着目して、本メカニズムでは、前述の直和の論理概念にもとづいた見え方の計算を行う。見え方の計算はつぎの形式をもつ：

$$\text{見え方} \Rightarrow \text{典型姿勢 1} \oplus \text{典型姿勢 2} \oplus \text{典型姿勢 3} \quad (1.b)$$

本計算では、見え方を典型姿勢に分解する。直和の論理にもとづく見え方の計算例を Fig. 2 に示す。ここでは、見え方(view)を典型例 front, side および back に分解している。ただし、Fig. 2 の左側は実世界での分解状況を、また右側は、記号的分解状況を表わしている。

直和の論理にもとづく見え方の記述(1.b)は、対象の記述(1.a)と同様、幾何学的情報を生成することができる。実際、Fig. 2 の演算記号 $\downarrow$ を“位置・姿勢データの初

$$\oplus \oplus$$

期化”に対応づけられよい。この初期化は、典型姿勢に関する座標変換にほかならない。この意味で、幾何学的情報の生成規則を含めた計算規則(1.b)を Algebra of Visible と呼ぶ。このような Algebra of visible にもとづく見え方の記述は、Algebra of Objects にもとづく対象の記述と同様、記号的計算可能かつ不完全である。すなわち、実世界での見え方(Fig. 2 の左側)を記号表現(同右側)に対応づけることができるが、全体の見え方(同上

側)を典型例の見え方(同下側)で被いつくすことはできない。

ただし、典型姿勢を実環境での見え方に変形するプロセスが構成できる場合には、見え方の記述は実環境と一致するという意味で、十分に補充されたものとなる。したがって、対象知識の完備化は、つぎの条件を満たす観測系の導入に帰着する：

- C-1：不完全な、場合によっては誤った、対象記述のもとも起動可能な許容性。
- C-2：対象記述の省略に影響されることなく典型姿勢を実環境に一致させる頑健性。
- C-3：変形を受ける対象記述の妥当性を計量する反応性。

3. 観測系の構成と対話的操作

以下、前述の条件 C-1 から C-3 を満たす観測系に対話型操作系のもとで構成できることを示す。さて、前述のように、対象の記述水準は作業文脈に依存してダイナミック決定される。したがって、作業着手に先行して(たとえば、設計時などに)対象記述を完成しておくことはきわめて困難である。一方、現実の3次元世界では、見え方は対象に関して加法性を満たさない。すなわち、対象を付加した場合には、ほかの対象に対する隠蔽などの相互干渉により、全体的な見え方の変化を発生する。このことは、見え方のシミュレーションを行うためには対象記述を確定しておかなければならないことを意味する。この矛盾は、構成と見え方を対象知識として同時に決定することにより解消される。

3.1 対話形式

知識完備化の流れのもとで観測系と対象知識の関係を Fig. 3 に示す。ここで、図の左側は現実の対象および見え方を表わし、右側は Algebra of Objects および Algebra of Visible にもとづいて記述された対象および見え方の知識を表わす。知識完備化メカニズムは、Fig. 3 左側の形態の情報を実環境から獲得したり、操作者に提示したりする。すなわち、Fig. 3 左側は完備化メカニズムのインタフェース条件を表わす。一方、本メカニズムは、Fig. 3 右側のレベルで観測系を操作し、対象知識を完備化する。すなわち、Fig. 3 右側は、完備化メカニズムの内部計算形式を表わす。

具体的には、本メカニズムは、Fig. 3 の流れにしたがって対象知識を検索し、ただちに見え方のシミュレーションを行う。すなわち、不完全な知識しか利用できない状況でも、本メカニズムは、その範囲で動作を開始する。具体的には(1.a)式の右辺に指定された要素の範囲で、本メカニズムは構造物を構成し、見え方のシミュレー

Fig. 2 Algebra of visibles

Fig. 3 Interactive modelling process

ションを行うとともに、その結果を画像処理プロセスおよび操作者に提示する。また、本メカニズムは、操作者の注目範囲に対応して対象知識を作りだす。いい換えれば、本メカニズムは、同一対象に対しても、作業文脈に依存して異なる対象知識を生成する。具体的には、この注目範囲は(1.a)式の右辺として表現される。たとえば、Fig. 3 では、 $\text{cap} \Leftrightarrow \text{cover} \Leftrightarrow \text{disk}$ と表現され、結果として対象の外輪郭はシミュレーションされるが(実線で表示)、構成要素としての knob や hole は省略される(波線で表示)ことになる。このような不完全な見え方のシミュレーションを注目形態に適合させることは、さまざまな「背景雑音」のもとで対象を認識することと等価である。本メカニズムは、C-2 および C-3 の意味で頑健かつ反応的な画像処理プロセスの導入によりこの背景雑音に対処する。

3.2 位置情報の獲得

Fig. 2 に示したように、記号的な位置・姿勢の指示は、本質的に不完全である。しかしこのような不完全性の解消を操作者に全て任せるのは、操作性ならびに記述精度の保証の両面で、問題が多い。そこで、本メカニズムでは、離散(有限)的な位置・姿勢指示にもとづいて対象画像から実際の位置・姿勢を獲得するプロセスを導入する。対象の位置・姿勢獲得プロセスを Fig. 4 に示す。ここで、対象の位置は、実世界(Scene)内での左右(h)前後(d)上下(v)方向への移動により、また、姿勢は、各軸回りの回転(p, r, y)により記述されている。Fig. 4 で M および A

Fig. 4 Vector field coding

はそれぞれモデルおよび対象の輪郭を表わし、 θ および $\hat{\theta}$ は位置・姿勢の真値および推定値を表わす。本プロセスはパターン力学³⁾の原理にしたがって設計されている。すなわち、本プロセスでは、輪郭像(エッジ・パターン)を画面(XxY)内に拡散させた場合 ϕ を求め、この勾配ベクトル場 ϕ を、対象の位置変化によって生じる画像の流れ(オプティカルフロー)の近似として用いる(Micro Feature)。この近似の結果、位置および姿勢の修正量 $\hat{\theta}$ は、ベクトル場 ϕ の線形変換として機械的に(すなわち、モデルと画像の対応点決定などの高度な処理を用いることなく)計算することができる(Object Feature)。ただし、 W はオプティカルフローの構造を表わすベクトル W_h, W_d, W_v, W_p, W_r および W_y を用いて $W = [W_h, W_d, W_v, W_p, W_r, W_y]$ のように決定される重み係数である(Optical Flow Pattern)。このように得られた位置・姿勢の推定値は、良好な収束性を示すことが確かめられている¹⁾。

パターン力学の性質上、上記位置・姿勢獲得プロセスは、誘引点の集合内で局所的に収束することになる。ここに、誘引点とは、エッジ・パターンと部分的に重なるモデル像に対応する位置・姿勢である。いい換えれば、位置・姿勢の推定値は、原理的に、真の位置・姿勢を含む誘引点集合に包含されることになる。一定、本プロセスにもとづく位置・姿勢の推定値は、離散化の影響により、誘引点の周りでリミットサイクルを描くことが知られている¹⁾。したがって、本プロセスは安定化情報を内在

している：すなわち、プロセスの収束状況をプロセスの出力自体にもとづいて判定することができる。いい換えれば、本プロセスは、位置・姿勢の不確定性を連続無限の不確定性から離散有限の不確定性に減少する機能をもつ。このことは、本プロセスの導入により、実環境の対象がもつ知識を(1)式を用いて計算可能となることを意味する。また、局所収束性は、対象の部分モデルと実対象全体像との照合を可能とする。このことは、知識完備化を行う際、完全な対象記述が得られていない状況でもモデルの照合が可能となることを意味する。すなわち、C-2を満足する観測系の構成方式が得られた。

3.3 推定結果の評価

上記位置・姿勢の離散化により、対象の同定は、有限の見え方のテストに帰着する。ここでFig.2の展開が、作業文脈で要求される対象形状の複雑さに比べて十分細かく離散化されているものとする。このとき、位置獲得プロセスの誘引点はFig.2の記号操作規則(Algebra of Visibles)にもとづいて予測することができる。したがって、対象を同定するためには、各誘引点に対応する対象の見え方とエッジ・パターンの一致性を計量すればよい。

ただし、意図的に省略された対象記述のもとでは、エッジ・パターンと見え方の画像としての一致度は評価尺度には使えない。そこで、本メカニズムでは、対象の見え方とエッジ・パターンを構造レベルで投影的に照合する。パターンの構造は、輪郭像を構成する線分の組合せにもとづいて決定する。具体的には、Fig.4のプロセスで得られた位置推定値にもとづいて対象輪郭像を含む注目領域を設定し、注目領域とその領域内に分布する直線集合の対として輪郭像の構造を表現する(Fig.5)。このような表現により、対象輪郭は、各線分の位置 ρ と方向 θ を表わすパラメータ $\xi=[\rho \theta]$ にもとづいて符号化されることになる。Fig.5の例では、対象輪郭像は、注目領域 Σ に

対応するパラメータ・リスト $[\Sigma: \xi(1) \xi(2) \xi(3) \dots]$ と同一視されることになる(Structural Equivalence)。このような符号化の結果、対象の見え方とエッジ・パターンの同一性評価は対象モデルに対応するパラメータのリストとエッジ・パターンに対応するパラメータのリストの照合計算に帰着する。

本メカニズムでは、意図的な対象記述の省略を考慮して、つぎの包含関係にもとづいて投影可能性を計算する¹⁴⁾：

$$\pi[\Sigma, A; M] \Leftrightarrow E[M \cap \Sigma] \subset E[A \cap \Sigma] \quad (2)$$

すなわち、本メカニズムでは、モデルに対応するパラメータ・リスト $E[M \cap \Sigma]$ がエッジ・パターンから抽出したパラメータ・リスト $E[A \cap \Sigma]$ に含まれるとき、 $\pi[\Sigma, A; M]$ 、すなわち、“モデル M は真である可能性がある”と判定し、 $E[M \cap \Sigma]$ に $E[A \cap \Sigma]$ 以外の成分が含まれるとき $\neg \pi[\Sigma, A; M]$ 、すなわち、“モデル M は真ではない”と判定する。本ルールにもとづく投影可能性の計算例をFig.6に示す。Fig.6の例では、注目領域 Σ に対応する二つの対象モデルが $E[M_1 \cap \Sigma] = [\Sigma: \xi(1; 1) \xi(1; 2) \xi(1; 3) \xi(1; 4)]$ および $E[M_2 \cap \Sigma] = [\xi(2; 1) \xi(2; 2) \xi(2; 3)]$ とパラメータ・リスト化され、注目領域から検出したエッジ・パターンが $E[A \cap \Sigma] = [\Sigma: \xi(1) \xi(2) \xi(3) \xi(4) \xi(5) \xi(6) \xi(7) \dots \xi(N)]$ の求められている。この場合には、ルール(2)は、命題 $E[M_1 \cap \Sigma] \subset E[A \cap \Sigma]$ および命題 $E[M_2 \cap \Sigma] \not\subset E[A \cap \Sigma]$ が成り立つと判定する。ただし、パラメータ $\xi(1; 1) \xi(1; 2) \xi(1; 3) \xi(1; 4)$ と $\xi(1) \xi(3) \xi(4) \xi(6)$ それぞれ対応し、パラメータ $\xi(2; 1) \xi(2; 3)$ と $\xi(3) \xi(7)$ がそれぞれ対応するものとする。このように、判定ルール(2)のもとでは、注目部分のみを取り出した対象記述の妥当性を、省略部分に無関係に、評価することができる。このことは、意図的な省略のもとでもC-3の反応性を満足する観測系

Fig. 5 Image structure representation

Fig. 6 Circumscriptive matching

を、記号処理の枠組みのもとで、構成できることを意味する。

3.4 観測系と計算系の投影的結合

判定ルール(2)のもとでは、Fig. 6 に示すように、合成規則を導出することができる (Pattern Composition)。具体的には、見え方レベルでの対象の複合および部分-全体関係の計算を、パラメータ・リストの包含計算に対応付けばよい。さらに、対話的な対象知識の増大に対処するためには、計算規則(1)を Fig. 3 の流れのもとで適用し、対象モデルのパラメータ・リストを追加すればよい。すなわち、判定ルール(2)は、ダイナミックな記述の補充をも含めて、計算規則(1)に適合するものとなっている。

このことは、判定ルール(2)を Fig. 4 の推定プロセスとともに動作させることにより、C-1 の許容性を満足する観測系が得られることを意味する。ただし、この観測系と計算系の結合は“注目対象が画面にみいだされるか否か”のみを評価するという意味で投影的である。すなわち、計算規則(1)と判定ルール(2)のもとでは、“対象の選択”および“否定”をパラメータ・リストの計算で表現することはできない。いい換えれば、本知識完備化メカニズムは、構造物の記述を詳細化してゆく過程では、投影可能対象を全て選択するように動作する。反面、“…以外の対象”という形式の記述は受け入れない。ただし、これらの制約は、対話的な作業環境同定では、あまり障害にならないと予想される。

4. 実 験

本メカニズムを用いた作業環境同定システムを試作し、機能確認実験を行った。確認すべき機能は、(1)式の形式をもつ不完全な対象知識を画面操作を通して取り出す機能、および、取り出した対象知識を観測を通して

完備化する機能である。

4.1 対象検索実験

計算規則(1.a)より、構造物記述の生成過程は要素記述を付加する手続きに帰着する。この点に着目して、画像上での位置の指示にもとづいて要素記述を検索するプロセスの実験を行った。本実験では、背景雑音中で知識完備化メカニズムを起動する状況を設定した。実験結果の一例を Photo. 1 から 3 に示す。Photo. 1 に、実験に用いた環境を示す。この実験では、カメラ前方約 5 m におかれた直径約 30 cm および約 15 cm のパイプを指示対象として設定した。また、単純化のために、それぞれのパイプは床面に対してほぼ水平あるいは垂直に設置され、管壁に対してほぼ正面から撮影されているものとした。ただし、実際の状況を模擬するため、対象物の周囲および背景については特に配慮していない。すなわち、本実験では、“セマンティックな雑音”中で一貫性を計量することになる。

本実験では、それぞれの対象の位置と大きさを画面上で指示した。具体的には、Photo. 2 に示すように、実験環境を撮影した通常のモニタ画面上に自己のモデルを発生させ、対話的に測量対象に接近させることにより各対象の概略位置を指示した。このような概略指示を受けて、システムは Fig. 6 の方法で対象記述を検索し、検索記述の一致状況を Photo. 3 に示すように、操作者に提示す

Photo. 1 Scene

Photo. 2 Graphic instruction

Photo. 3 Notification

る。ここでは、照合の成立したモデルに含まれる外輪郭を、ディスプレイ上のエッジ・パターンに重ね書きしている。

本実験では、Fig. 2 に示す方法での物体距離の入力誤差は ± 5 cm 程度であった。本実験により、位置入力がある程度の誤差を含む場合でも対象記述を検索できることが確かめられた。これは、概略指示にもとづいて知識完備化プロセスを起動できることを意味する。

4.2 対象確認実験

要素記述の正当性を確認する機能を付加することにより、完備化プロセスの操作を大幅に削減できる。この点に着目して、取り出した対象記述を検証するプロセスの実験を行った。本実験では、複数のモデルが想定される状況を設定し、Fig. 3 の知識完備化プロセスを動作させた。具体的には、カメラ前方約 2 m に置かれた 1 辺約 30 cm および直径約 30 cm の物体(cap)を指示対象として設定した。また、実験に当たっては、対象はテクスチャをもつテーブル上に設置し、背景雑音の影響をも合せて評価することにした。

検証は、エッジ・パターンと見え方モデルにもとづいて行われている。見え方モデルの生成状況を Photo. 4 および Photo. 5 に示す。これらの見え方モデルは、Fig. 4 のプロセスのもとでエッジ・パターンとモデルの誘因点を位置とみなして生成されている。Photo. 4 には、正しい対象記述にもとづいて推定した見え方モデルが示さ

れている。正しい見え方モデルは、対応するエッジ・パターン上にほぼ一致して重ね書きされることになる。一方、Photo. 5 には、誤ったモデルを人為的に指示したときのシステムの振る舞いが示されている。この場合にも、システムは、いったんエッジ・パターンとモデルの輪郭の誘因点(いうまでもなく“真値”ではない)を計算し、誘因点に対応する見え方モデルを生成している。当然、このような誤ったモデルは正しい対象知識を与えないが、Fig. 6 の判定計算を起動することはできる。いい換えれば、正しくないモデルに対しても Fig. 4 のプロセスは適用され、その結果にもとづいて、判定計算に必要な見え方の構造モデルが生成される。この判定計算の間、操作者には、順次検索された対象モデルと画像との一致状況が提示される。

見え方モデルは Fig. 5 の方法で構造化される。このとき、注目領域も同時に決定する。具体的には、本実験では、画面を縦横それぞれ 16 に分割して得られる 256 の小領域を設定し、見え方モデルを含む小領域を注目領域として決定している (Fig. 7)。このように注目領域を設定した場合には、投影可能性判定を並列化できる。具体的には、Fig. 6 の手順を各小領域ごとに独立プロセッサで実行し、結果を集積すればよい¹¹⁾。本実験では、画面分解能を 256×256 とした場合の構造検出能力をシミュレーションにより評価した。シミュレーションは Hough 変換と逐次方最小 2 乗法を一体化した再帰型構造検出アルゴリズム⁹⁾を用いて行った。シミュレーション結果の一例を Fig. 8 に示す。本ケースでは、各プロセッサは 16×16 の分解能の画像を処理すればよいことになる

Photo. 4 View generation-1

Photo. 5 View generation-2

Fig. 7 Structure projection

Fig. 8 Simulation results

(Sample Image). ここでは、パラメータ空間を、方向 θ に関しては 6 分割 (30 度メッシュ)、位置 ρ に関しては 8 分割 (2 画素メッシュ) してシミュレーションを行っている。再帰型構造検出アルゴリズムは、本図に示すように、複数の線分を ρ - θ パラメータ空間で識別し (Detected Segments)、かつ、10 回程度の繰返しの後には精度のよいパラメータ推定値を生成している (Iteration-Estimates)。実際、本シミュレーションより、 ρ , θ の推定値とも画像分解能 (距離 1 画素、角度約 $1/16$ rad = 3.58 deg) を十分に下回る誤差で収束していることがわかる。

5. 検 討

現実の複雑な環境内で対象を認識することはコンピュータビジョンの重要な課題であり、さまざまな研究が行われている。ただし、環境の複雑さと対象の多様性が同時に発生する場合には、組合せ爆発が起こり、実時間処理がきわめて困難となる。実際、現在までのところ、フィールドで動作する実時間版対象認識システムの開発は、モデルを限定できる (“道路” + “障害物”) としてカテゴライズする場合⁹⁾ および対象の存在領域が特定できる場合⁹⁾ に留まっているようである。これに対して、本研究では、認識対象が一連の作業の流れの中で発生することに着目し、対象記述の生成過程の制御を試みたものである。ただし、作業を円滑に進めるためには、記述の完

成を待つことなく対象モデルを照合しなければならない。そこで、本研究では、CAD や画像理解で重視される記述の客観性と完全性を放棄することにより、生成過程の柔軟さを追及している。実際、生成過程は、画面操作にもとづく対象記述の包含的検索として計算機実現されている。反面、完備化メカニズムが作り出す対象記述は観測画像の上でのみ意味をもつことになり、観測を引き起こす作業文脈に依存するという意味で、もはや客観的なものではない。

現実の複雑な環境で、人間は、無数の対象を苦もなく認識しているように思われる。このような無数の対象モデルの記憶方法としては、“起こりそうにない (Improbable) 知識とその完備化” 概念¹⁵⁾ にもとづく生成的記述が有効と思われる。本研究では、対象の構成と見え方を計算規則化することにより、ありそうにない対象を記号的に記述している。このような特異的な知識は、いうまでもなく、直接観測量と照合することはできない。本研究では、この知識-観測ギャップを埋める情報処理機構を“論理投影 (Logic Projection)” 概念¹²⁾ のもとに設計した。得られたメカニズムは、位置・姿勢計算ならびに構造計算ともに、包含関係にもとづいて決定を下す。このような弱い関係にもとづくプロセスは、自己完結的な意思決定能力はもたないが、ありそうにない知識の完備化に適した論理的性質はもっている¹⁵⁾。いい換えれば、画像処理 (特に照合) のシステムと考えた場合 (具体的には対象記述を固定して本システムを動作させた場合)、本メカニズムはさまざまな条件下で撮影される画像に自律的に適応する能力はもたないが、記号的に生成される対象記述に即応する能力をもっている。この意味で、本メカニズムは、画像から作業文脈が一意的に決定できるとは限らない以上原理的に不可欠な、“問題を画像処理過程に反映させる” 対話プロセスとの親和性を備えている。

本稿で述べたプロトタイプシステムでは、対象形状は操作者が設計するものとしている。このような形状設計系との結合は、作業に先行あるいは並行して設計が行われる人工物生産システムでは、許容される前提と思われる。ただし、本稿で述べた情報処理メカニズムは、形状が映像化されることを要請するのみで、その生成プロセスには依存しない。このことから、本メカニズムは、形状生成系¹⁰⁾ を接続することにより、広範な非人工的対象の同定問題¹¹⁾ にも適用できるように思われる。

6. おわりに

遠隔状態で作業対象を同定する情報処理メカニズムを開発した。本メカニズムでは、操作者は同定対象の概略位置を指示し、計算機は、対象の識別ならびに位置の決

定を行う。プロトタイプを用いた実験の結果、位置や姿勢を数値的に意識することなく、対象の記述を生成できることが確かめられた。

本稿を草するにあたり、制御理論の形状情報処理への応用に関して平素御指導賜っている岡山理科大学工学部砂原善文教授に深甚の謝意を表す。また、大規模構造物の設計・生産技術に関して種々ご指導賜った(株)日立製作所日立工場好永俊昭副技師長および同社宇宙技術推進本部熊本健二郎主任技師ならびに実験に協力頂いた同社機械研究所濱田朋之研究員および土屋雅弘氏に深謝する。本論文について、校閲者の方々から貴重なご助言を賜った。ここに付記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) T. Aoki, and K. Kamejima : A Recursive Optical Flow Approximating Approach to 3D Object Pointing, 24th ISCTE Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 159/162 (1992)
- 2) M. Blancard: Road Sign Recognition: a study of vision-based decision making for road environment recognition, Masaki, I., Ed., Vision-based Vehicle Guidance, Spriger Verlag, 162/172 (1992)
- 3) DARPA (Defence Advanced Research Project Agency) Information Science and Technology Office: Proceedings of Image Understanding Workshop, 1-11, (1987)
- 4) K. Kamejima, Y. C. Ogawa and Y. Nakano : Environment Description for Mobile Robot Navigation, 情報処理学会第 31 回全国大会講演予稿集, 1265/1266 (1985)
- 5) K. Kamejima, Y. C. Ogawa and Y. Nakano: Image Structure Detection with Application to Mobile Robot Navigation, Proc. IEEE IECON'86, 713/718 (1986)
- 6) 亀島, 渡部: インタラクティブ・マッピング—2.5 次元知覚を利用した対話型環境同定方式—, 第 4 回 SICE ヒューマン・インタフェイス・シンポジウム論文集, 211/214 (1987)
- 7) K. Kamejima, I. Takeuchi, Y. C. Ogawa and T. Hamada : Human Interface for Interactive Robot Operation, Proc. IAEA/CEC/OECD/NEA Int. Conf. on Man-Machine Interface in the Nuclear Industry (Control and Instrumentation, Robotics and Artificial Intelligence), Tokyo, Japan, 15-19 February, IAEA, Vienna 559/564 (1988)
- 8) K. Kamejima, Y. C. Ogawa and Y. Nakano: A Fast Algorithm for Approximating 2D Diffusion Equation with Application to Pattern Detection in Random Image Fields, Futagami, T., Tzafestas S. G. and Sunahara, Y. eds., "Distributed Parameter Systems: Modeling and Simulation", Proc. IMACS/IFAC Int. Symp. on Modelling and Simulation of Distributed Parameter Systems, North Holland, Amsterdam, 557/564 (1989)
- 9) K. Kamejima, T. Hamada, I. Takeuchi, K. Kumamoto and Sh. Takarada : Information-Control Architecture for Space Automation and Robotics Systems, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 221/224 (1990)
- 10) K. Kamejima, T. Aoki and R. Dennert : Simultaneous Tracking and Generation of Non-Deterministic Pat-

terns, 23rd ISCTE Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 177/180 (1991)

- 11) K. Kamejima, T. Hamada, M. Tsuchiya and Y. C. Watanabe : From Self Navigation to Driver's Associate: an application of mobile robot vision to a vehicle information system, Masaki, I., Ed., "Vision-based Vehicle Guidance", Spriger Verlag, 173/203 (1992)
- 12) K. Kamejima, R. Dennert and Y. C. Watanabe: Open Logic Machine —an interactive perception architecture for unstructured scene analysis—, IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 82/87 (1992)
- 13) N. Magnemat-Thalmann and D. Thalmann: Computer Animation-Theory and Practice, Springer-Verlag, Tokyo (1985)
- 14) Y. C. Ogawa, K. Kamejima and Y. Nakano : Syntactic Image Analysis for Environment Understanding, IEEE International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, 266/271 (1987)
- 15) G. Palm : Associative Memory and Threshold Control in Neural Networks, in Casti, J. L. and Karlqvist, A., eds., "Real Brains, Artificial Minds", North-Holland, New York, 165/179 (1987)
- 16) 瀬川, 井上, 熊本: 立体視を応用したグラフィックスと 3 次元教示, 第 2 回 SICE ヒューマンインタフェイスシンポジウム, 229/236 (1986)
- 17) S. Tsuji : Continuous Image Interpretation by a Moving Viewer, Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, Roma, 514/519 (1988)

著者紹介

亀島 鮎二 (正会員)

1973 年, 京都工芸繊維大学工学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所中央研究所勤務。同社機械研究所を経て, 94 年大阪工業大学工学部経営工学科教授。機械システムならびに協働情報システムの制御に関する研究に従事(工学博士)。

青木 利幸

1990 年, 京都工芸繊維大学工学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所機械研究所勤務。3 次元画像認識におけるパラメータ推定に関する研究に従事, 90 年榎木記念賞奨励賞受賞。

渡部 優理子

1983 年, 千葉大学工学部画像工学科卒業。同年(株)日立製作所機械研究所勤務。環境認識ならびにロボット視覚に関する研究に従事。