

頂点辞書の自動作成とその応用

杉原 厚吉

(電子技術総合研究所)

1. はじめに

3次元物体の物理的性質はそれを描いた透視図に大きな制約をもたらすため、その制約をシーンの解析に利用することができる。 Huffman [1] と Clowes [2] はある基本的な多面体の線画に現われ得る頂点を教え上げ、それを利用して線画の中の線を物理的性質(凸稜, 凹稜, 輪郭)に従って分類した。 Waltz [3], Sugihara [4], Kanade [5] は、この方法をそれぞれ陰影線付きの線画, 隠れ線付きの線画, 折紙細工の線画に拡張した。これらの研究は完全な線画(線が欠けていたりしない線画)を解析するためには役立つ。しかし、線画が不完全な場合には現われ得る頂点の種類が非常に増すためあまり有効な手法とはなり得ない。

一方、シーンの表面の各点までの距離のデータが与えられた場合には、稜線が見つかると同時にその物理的性質もわかってしまうため、現われ得る頂点の一覧表をまだ見つけてない稜線を予測するために利用できる。著者はこの方針に基づいた距離データ解析システムを試作し、データ解析の効率と信頼性が高められることを示した [6]。すなわち、解析の途中で得られている線画を現われ得る頂点の一覧表と比較することにより、欠けた線の場所と種類を予測し、その予測に従って次の解析を進めるというものである。この方法は、完全な線画ではなく実際の生データを対象としているという意味で実用的なものである。

上の方法の最も大きな欠点は——頂点形状の知識を利用する他の方法にも共通の欠点であるが——三面頂点という仮定である。すなわち、シーン中の物体の各頂点はちょうど3個の面に隣接しているという仮定の下で、現われ得る頂点形状を教え上げている。この仮定を単純に除くと現われ得る頂点の種類は無限個となるため上の手法は使えなくなってしまう。

本ノートではこの欠点を克服するための一つの試みを提案する。それは頂点形状の一覧表を自動作成する方法である。シーンに現われる多面体の種類は有限個であると仮定し、そのような多面体集合をユーザが与えると、線画に現われ得る頂点の種類を自動的に教え上げそれを解析に利用する。多面体の種類が有限であるため現われ得る頂点形状も有限個となる。本方法は多面体を有限の種類に限るために一般性がないように思われるかもしれないが、しかし、対象とする世界が変わった場合には多面体集合さえ変更すればシステムが自動的に頂点辞書を作りなおすという意味において一般性はそこなわれない。

2. システムの構成

システムの機能を示したのが図1である。この図において長方形はシステムの構成要素を表し、無枠は情報の種類を表し、矢印は情報の流れを表す。対象世界は有限個の多面体の集合によって表されるものと仮定する。システムは次の四つの構成要素から成る。

1. 距離測定部——3次元のシーンから三角測量によって距離のデータを得

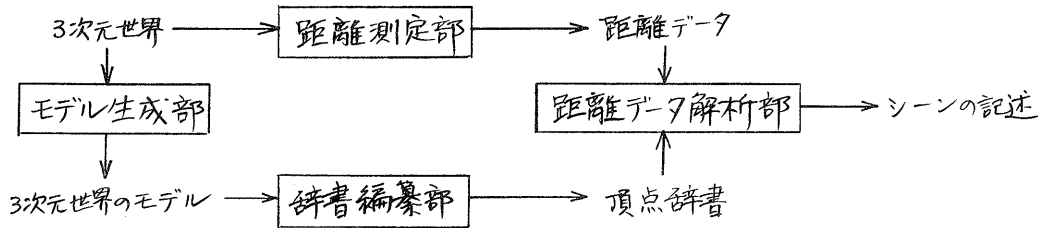


図1 頂点辞書の作成・利用システムの構成

- るための部分。
2. モデル生成部 —— ユーザが対話的に使い、3次元世界のモデルを有限個の多面体の集合として生成するための部分。
 3. 辞書編集部 —— 3次元世界のモデルから頂点辞書を作成するための部分。
 4. 距離データ解析部 —— 距離データを解析し、シーンの構造的な記述を作り上げるための部分。データの解析に際しては頂点辞書を利用して解析の効率と信頼性を高める。

以下の節では、これらの構成要素を一つ一つ見ていく。

3. 距離の測定

シーンでの距離を測定するための三角測量法を図2に示す。光源 O からシーン Σ に向けて光線を発し、シーンの表面の照らされた点の位置をテレビカメラ O' で観測する。 i - j 座標系を持った仮想的な面 S と光線との交点を (i, j) とすると、点 (i, j) によって光線の方向を一義的に表現できる。この光線によって照らされた点 $P(i, j)$ のテレビ撮像面 I での像 $P'(i, j)$ の水平座標値を $\alpha(i, j)$ とする(図2を参照)。 $\alpha(i, j)$ の値と、 O, O', S, I の相対的位置がわかれば、三角測量の原理によって $P(i, j)$ の3次元座標値も計算することができる。従って $\alpha(i, j)$ は距離の情報を持っている。そこで、2次元配列 $\{\alpha(i, j) \mid i=1, \dots, m, j=1, \dots, n\}$ を距離画像と呼ぶ。

実用上は、光線を照射しているのではシーンを走査するのに時間がかかるから、垂直のスリット(細い溝)を通した光をシーンに当てることにより垂直な線に沿ったデータ $\{\alpha(i, j) \mid j=1, \dots, n\}$ をテレビの1走査時

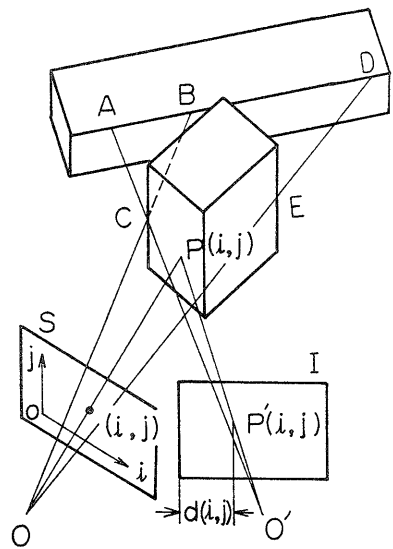


図2 距離測定法

間内に得ることができる(大島・高野[7]を参照)。

ここで注意すべきことは、点 (i, j) が与えられたときいつでも $d(i, j)$ の値が測定できるわけではないという点である。なぜなら、 $d(i, j)$ を測定できるためには照らされた点 $P(i, j)$ がテレビカメラから見えなければならぬからである。たとえば図2の線分ABは前にある別の物体にさえぎられてテレビカメラからは見えない。従って、この部分に対応する距離画像上の領域では $d(i, j)$ の値は不定のまま残される。このように距離画像には、一般に値の定まらないいくつかの領域が含まれている。

4. 3次元世界のモデルの生成

3次元の世界を有限個の多面体として定義し、それらの多面体のモデルをシステムの内
部に生成するための部分がモデル生成部である。モデル生成部の基本的な部分は
高級言語GEOMAPで書かれたプログラムである。GEOMAPとは、電研研によ
って開発された3次元形状を扱うためのFORTRANサブルーチン集である(Kimura
and Hosaka [8])。ユーザはシステムと対話しながら3次元モデルを構成して
いくのであるが、その際、まず柱体や錐体等の基本的形状をコマンドによって生成
し、次にそれらに集合論的演算(合併、共通部分、差等)を求める演算)を施すことによ
って次第に目的の形状記述を作り上げていく。ユーザは、必要ならば任意に指定した
視点から見たときの透視図を得ることもできる。

図3(a)はモデルとして定義された多面体集合の例である。この図の右端の立体
モデルを生成する過程を図3(b)に示した。まず2個の直方体を作り、次にそれを
適当な位置と姿勢に持ってきて、最後に両者の合併集合を作る。このように対話を
しながら多面体を作り上げていくことにより、ユーザの仕事は著しく軽減される。
(多面体の各頂点の3次元座標値や頂点・稜線・面の隣接関係に関するデータを
すべて数値としてキーボードから打込むのはユーザにとってかなり苦痛である。)

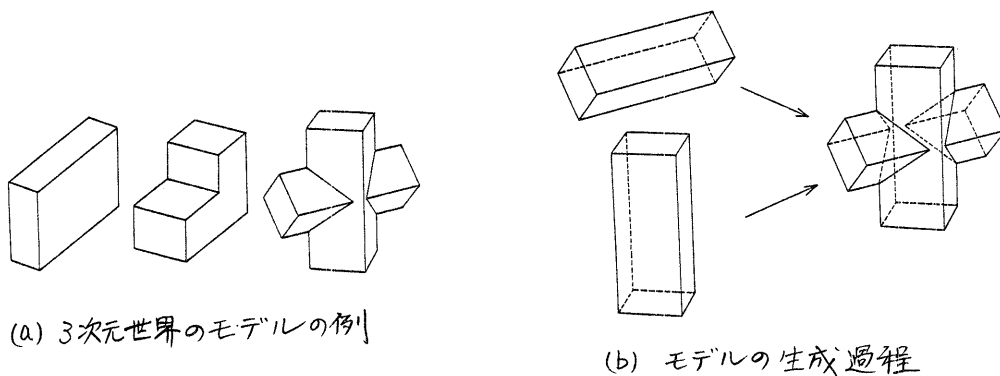
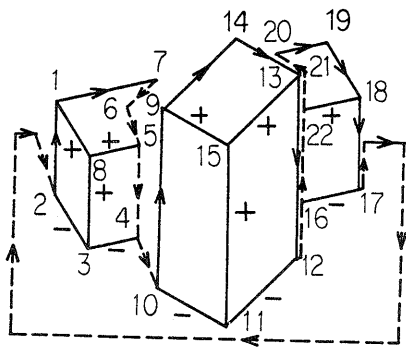


図3 3次元世界のモデルとその生成過程

5. 頂点辞書の作成

5.1. 線の分類 図2のシーン(2個の直方体が机の上に置かれているシーン)の線画
を図4に示す。距離画像から得られる線画では、線をその物理的性質に従って次
の4種に分類するのが便利である。すなわち、凸線、凹線、輪郭線、影線である。



- + — 凸線
- - — 凹線
- ← — 輪廓線
- - - ← - - - 影線

図4 距離画像から得られる線画

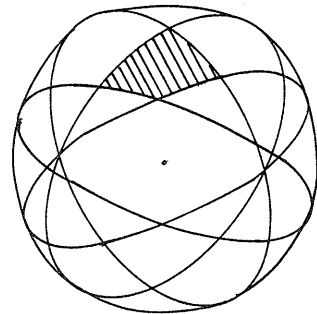


図5 球面多角形

凸線(実線に+印で表す)は両側の面が凸に交わってできる稜線を表し,凹線(実線に-印)は両側の面が凹に交わってできる稜線を表し,輪廓線(実線に矢印)は右側は物体の面であるが左側は背景であるような稜線を表し,影線(点線に矢印)は右側は物体であるが左側は手前にある他の物体にさえぎられて距離の測定できない領域であることを表す。最後の線の種類は距離画像に特有のものである。たとえば図2の点Aの右側はテレビカメラO'から見てとさCにさえぎられるため,図4に示すように点Aは影線上に,点Cは輪廓線上にくる。

5.2. 可能接統点の教え上げ シーンに関して次の二つの仮定を設ける: (1) シーンは有限個の多面体の集合の中の物体によって構成され, (2) 2個の物体の頂点や稜線が一致するような配置はとらない。この仮定の下でシーンの線画に現われ得る接統点(頂点の線画上への射影をこのように呼ぶ)を可能接統点と呼ぶ。

多面体の頂点が一つ与えられたときその頂点の見え方(すなわち接統点)を教え上げるためには次のような手続きに従えばよい。与えられた頂点を中心とする単位球を考えよう。頂点に隣接する各面を延長すると図5に示すように単位球と大円で交わる。これらの大円は単位球の表面をいくつかの球面多角形に分割する。そして,これらの球面多角形のいくつかは物質(多面体の材料となっている物質)の内部に,残りは空な空間の中にある。そこで,光源とテレビカメラを空な空間中の球面多角形の中に配置する組合せをすべて尽くすことによって,その頂点に対応する接統点をすべて作り出すことができる。

以上は視点が一般の位置にあるものとした場合の接統点の教え上げ方である。一方,視点が特殊な位置にある場合の接統点は,光源とテレビカメラの一方あるいは両方を球面多角形の辺の上あるいはかどに置くことによって作り出すことができる。

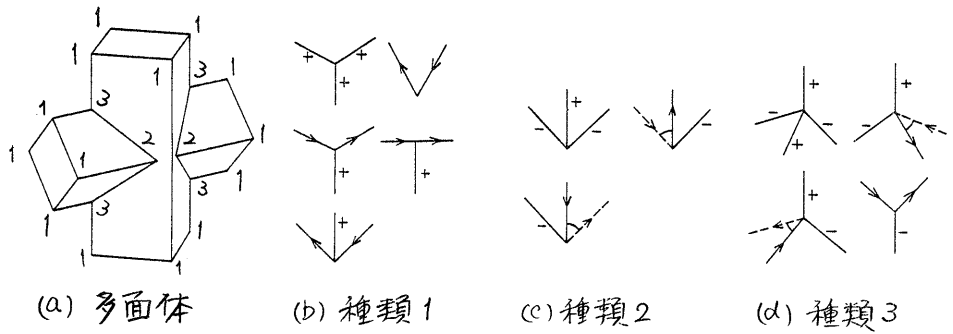


図6 可能接統点の数え上げ

図6(a)の多面体は見えない部分も含めて24個の頂点を持っており、それらは図に示したように1, 2, 3の3種に分類できる。種類1では3個の面が凸稜線で交わっており、種類2では3個の面が1本の凸稜線と2本の凹稜線で交わっており、種類3では4個の面が2本の凸稜線と2本の凹稜線で交わっている。これらの頂点に対応する接統点をそれぞれ(b), (c), (d)に示す。ただし、この図で輪廓線と影線を結ぶ円弧は影の因果関係を表す。

孤立した頂点を線画上へ射影してできる接統点は以上の方法で尽されるが、多面体を積重ねた場合には2個の物体の接点で新しい接統点の生じる可能性がある。シーンに関する仮定の(2)により、2個の物体の許される接し方は、図7に示すように(a)面と面、(b)頂点と面、(c)稜線と面、(d)稜線上の点と稜線上の点の四つの場合だけである。これらの頂点(q, r)や擬頂点(p, s, t)に対応する接統点も孤立した頂点の場合と同様の方法で数え上げることができる。

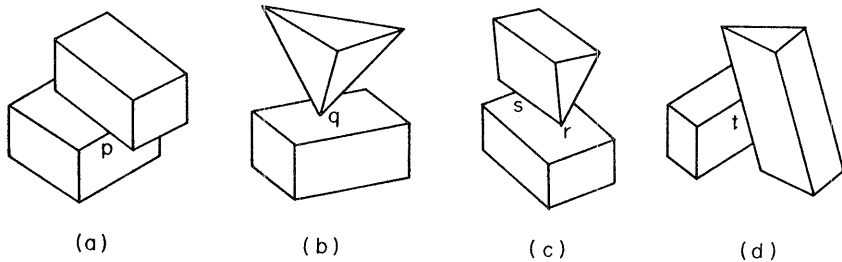


図7 2個の物体の許される接触の仕方

5.3. 頂点辞書 頂点辞書とは、可能接統点およびそれからいくつかの線を除いてできる接統点を節点とし、接統点の間の関係を有向辺で表したネットワークである。このとき、有向辺は、始点となる接統点に線を1本加えると終点となる接統点を得られることを表す。

頂点辞書の一部を図8に示す。ここでは、7個の接統点とそれらの関係が表現されている。長方形で囲んだ3個の接統点(x, y, z)は不可能な接統点であり、円で囲んだ4個の接統点(u, w, x, z)は可能接統点である。可能接統点

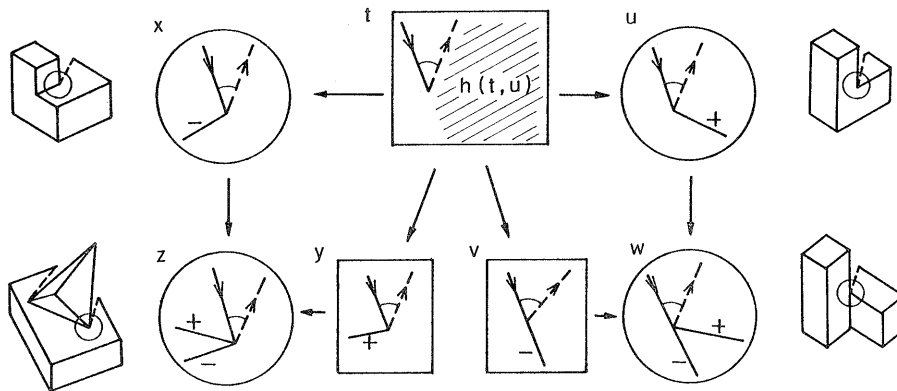


図8 頂点辞書の一部分

のそばには、その接続点が現われるシーンの例を示した。接続点を繋ぐ有向辺は線の追加を表す。たとえば、図8の接続点 t の斜線部に凸線を加えると、別の接続点 u が得られる。これに、さらに凹線を加えると接続点 w が得られ、これらを繋いで有向道 (t, u, w) が得られる。追加する線の順番を入れ替えると、別の有向道 (t, v, w) が得られる。このような有向道は、距離データの解析の途中でまだ見つかっていない稜線の存在を予測するための手懸りとなる。たとえば解析の途中で接続点 u が見つければ、この接続点のまわりには凹線が存在する“かもしれない”。一方、接続点 w が見つければ、この接続点のまわりには凸線が存在し“なければならない”。なぜなら、 v は不可能な接続点であり v を部分構造として含む可能接続点は w のみだからである。

可能接続点が教え上げてあるから、それからこのような頂点辞書を作る作業は機械的な手順である。

6. 距離データの解析

6.1. 主要サブルーチン 距離データ解析部はFORTRANプログラムとして実現されており、そこには次のような主要サブルーチンが含まれている。

線予測ルーチン：接続点のまわりでまだ見つかっていない線の存在を予測するためのルーチンである。接続点が与えられると、それを頂点辞書と比較し、その接続点のまわりではかに線が見つかる可能性があればそれらを列挙する。

予測検証ルーチン：予測された線が距離データの中に実在するかどうかを確認するためのルーチンである。検証には2種類のテストを行なう。一つは、距離データの値を調べて新しい線を探すテストであり、もう一つは、今までに見つかっている線の中からその属性が予測された線と一致するものを探すテストである。後者のテストが必須なのは、一般に線が抽出されたときにはその線の端点は孤立した一つの接続点としてそのまま残されるからである。

線追跡ルーチン: 予測検証ルーチンによって新しい線的一端が見つかったとき、その線を可能な限り追跡し線全体を抽出するためのルーチンである。距離データの値を局所的に調べることにより線の伸びている方向が決定できるため、その方向に少し進んだ点を中心にそのまわりを調べるという手順で、次々と線上の点を見つけていくことができる。この追跡は、線が消えてしまうかあるいはすでに抽出されている線にぶつかったとき終了する。

直線化ルーチン: 線追跡によって見つかった点列を直線の線分でおきかえるためのルーチンである。点列が与えられると、まず曲率の大きな点を見つけてその点で点列を分割する。次に、分割されたそれぞれの点列に直線をあてはめる。もし、よくあてはまる直線が存在しなかったら、その部分は点列のまま残しておく。また、分割点は新しい接続点として線画に登録する。

物体分割ルーチン: シーンの線画を単体物体に分割するためのルーチンである。2個の物体が接触するところで生じる接続点の種類がわかっているため、そのような接続点に沿って線画を分割する。

頂点位置修正ルーチン: 接続点に新しい線がつけ加えられたとき、その接続点の位置を修正するためのルーチンである。線が3本以上見つかったとき、接続点は、それらの交点の重みつき平均の位置として定められる。このとき、重みは線画上的線の長さである。(なぜなら長い線ほど位置誤差が小さいと考えられるからである。)

6.2. 解析の手順 距離データの解析は前処理と主要処理の二段階に分けられる。前処理では、いくつかの処理があらかじめ決められた順序で実行され、一方、主要処理では、いくつかのルーチンが相互に作用し合い、その時点までに得られている情報が最も有効に利用できるように次の処理手順が決められる。解析手順の概要は次のとおりである。(特にことわらない限り、次のステップに進む。)

[前処理]

1. 与えられた距離画像から矢線(輪郭線と影線)を抽出し、それをいくつかの直線部分に分けて、矢線上の接続点を見つける。
2. 矢線間の影生成関係を見つけ、矢線を輪郭線と影線に分類する。さらに、画像を、輪郭線と影線で囲まれたいくつかの連結部分に分割する。(分割された各連結領域を“物体”と呼ぶ。)

[主要処理]

3. すべての物体が解析済みなら処理を終了する。まだ解析の済んでいない物体があればその一つを選ぶ(この物体を“注目物体”と呼ぶ)。
4. 注目物体を構成する接続点がすべて解析済みなら9へ行くと。そうでなければ、解析の済んでいない接続点の一つを選ぶ(この接続点を“注目接続点”と呼ぶ)。
5. 線予測ルーチンによって注目接続点と頂点辞書を比べ、その接続点のまわりでまだ見つからない線を予測する。次に、この予測を予測検証ルーチンによって調べる。もし線が見つからなかったらこの接続点に“解析済み”の印をつけて4へ行くと。すでに見つかっている線——ただしこの線はまだ注目接続点には繋がっていない——で属性が予測と一致するものがあたら7へ行くと。新しい線が見つ

からたら6へ行く。

6. 線追跡ルーチンによって、5で見つかった線を追跡し、線の全体を抽出する。次に直線化ルーチンによってこの線上の頂点を見つけると同時に線の各部分を直線で置替える。
7. 見つかった線を注目接続点に繋ぐ。頂点位置修正ルーチンによって注目接続点の位置を計算しなおす。
8. 物体分割ルーチンによって、新しく見つかった線のまわりで線画の分割が可能かどうかを調べ、もし可能なら“注目物体”を二つに分割して3へ行く。分割できなければ5へ行く（このとき、注目接続点は同じものだが、新しい線が加えられたためにその“種類”は変更されている）。
9. 注目物体の占める画像領域全体にほかに接線がないかどうか調べる。もし新しい線が見つかったらその線の全体を抽出し（線追跡ルーチン）、その上の接続点を見つけて（直線化ルーチン）、4へ行く。もし見つからなければ、注目物体に“解析済み”の印をつけて3へ行く。

6.3. 解析例 図9は スリットを通した光の像を重ね合せて表示した距離データの例である。このシーンは2個の物体から構成され、一つは直方体の支持台、もう一つは2個の物体の相貫体であり、両方とも図3(a)のモデルの中に含まれる物体である。図10には、この距離データの解析過程を示した。

前処理において、まず輪郭とその上の接続点とを見つける。主要処理では、最初に接続点 $J1$ に注目する（図10(a)を参照、ただし、接続点 $J2$ は図中では単に i で示してある）。この時点では内部の線 $J1J3$ 、 $J3J2$ はまだ見つかっていないため、この接続点の種類は、図8のオと同じである。線予測ルーチンによって $J1$ のまわりで線が予測され、予測検証ルーチンによって実際に凹線が見つかる。線追跡ルーチンによってこの線が追跡され、全体が点列として得られる。直線化ルーチンによって新しい線 $J1J2$ の途中に新しい接続点 $J3$ が見つけられる（図10(a)）。そして二つの点列 $J1J3$ および $J3J2$ はそれぞれ直線に置換えられる。この時点で、接続点 $J1$ の種類は、図8のαに変更されている。 $J1$ のまわりではもうこれ以上新しい線が見つからないので、 $J1$ に解析済みの印をつけて次の接続点に注目を移す。

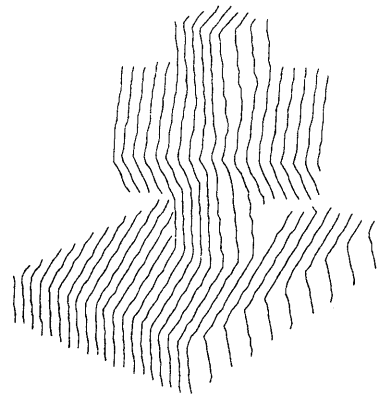


図9 距離データの例

次に、接続点 $J4$ に注目し、そのまわりでの線の予測を検証すると、予測と一致する属性を持った線がすでに見つかったことがわかり、その結果、 $J4$ と $J2$ が二つにまとめられる（これを新しく $J2$ と名づける）。 $J1$ も $J2$ も2個の物体が接触するところで生じる接続点なので、物体分割ルーチンによって線画が二つに分割される（図10(b)と(c)を参照）。

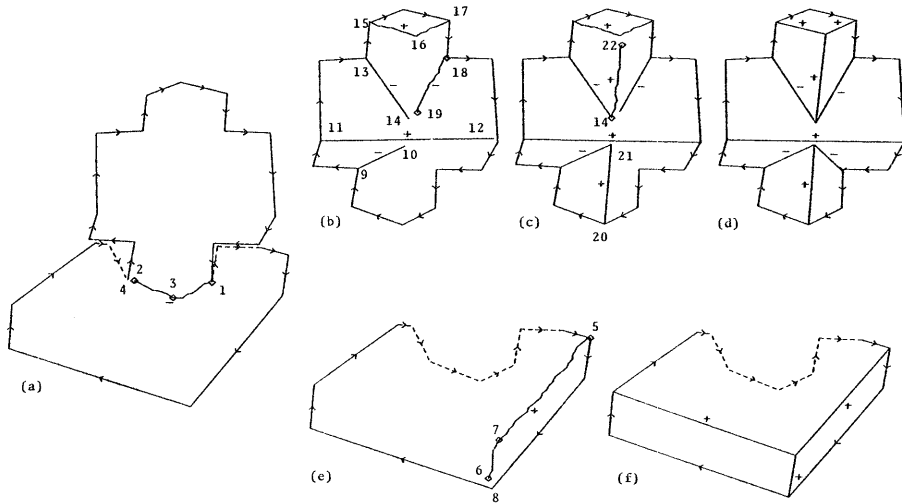


図10 距離データ図9の解析過程

接線点J5に注目したとき凸線J5J6 および新しい接線点J7が見つかり(図10(e)を参照), J8に注目したときJ6とJ8が一つにまとめられる。同様の処理が続けられて支持台の正確な記述 図10(f)が完成する。もう一方の物体も同様の解析により、最終結果 図10(d)が得られる。図中、接線点につけた番号は、線や接線点が見つかる順序を表す。

シーンの中央付近には7本の接線が集まって距離データの値は複雑に変化している。しかし 図10のように正しい解析結果が得られる。これは、頂点辞書の利用により、次に探すべき線が予測でき、また見つかった線の接線関係を矛盾なく決定できるためである。

7. おわりに

頂点辞書を利用した距離データ解析システムの試作実験について報告してきた。いたんよびる世界のモデルが有限個の多面体集合として定義されると、システムはその世界に関する頂点辞書を自動作成し距離データの解析に利用する。頂点辞書を利用することによって、まだ見つけていない線の存在を予測したり、見つかった線の接線関係を決定したりできるため、解析の効率と信頼性を高めることができる。またシステムの最終出力は、単なる線の集まりではなく隣接構造の明らかになった線であるため、物体の同定や機械の手による物体の操作のためにたんに役立つことができよう。

本システムには欠点もいくつかある。まず、頂点辞書は線画の局所的性質を表すに過ぎないため、頂点辞書に反しないからといって常に正しい線画であるとは限らない。大域的に矛盾のない線画であるかどうかを判定するためには [9] のような手法をシステムに組込で必要がある。次に、物体の分割も局所的な情報のみをたよりに行なっているため、時には、モデルの中に含まれている物体をモデルの中に含まれていない2個の物体に分割してしまうことがある。これを防ぐためには

シーンのモデルをもっと有効に利用する必要がある。また、輪廓線と影線も分類するためには影の原因となる物体がシーンに含まれていなければならぬのに、三角測量による距離画像では必ずしもこの条件は満たされていない。その結果、影線が誤って輪廓線とみなされることがある。これを防ぐためには三角測量以外の距離測定法を利用しなければならない。

謝辞

有益な御助言をください、長 電子技術総合研究所 白井 良明 視覚情報研究室長、名古屋大学工学部情報工学科 杉江 昇 教授、すばらしい高級言語 GEOMAP を使わせてください、長 東京大学工学部精密機械工学科 木村 文彦 助教授、距離測定装置を使わせてください、長 大島 正毅 視覚情報研究室主任 研究員 に深く感謝申し上げます。

文献

- [1] D. A. Huffman: Impossible objects as nonsense sentences, Machine Intelligence 6, B. Meltzer and D. Michie (eds.), Edinburgh Univ. Press, Edinburgh, 295-324, 1971.
- [2] M. B. Clowes: On seeing things, Artif. Intell., 2 (1971), 79-116.
- [3] D. Waltz: Understanding line drawings of scenes with shadows, The Psychology of Computer Vision, P. H. Winston (ed.), McGraw-Hill, New York, 19-91, 1975.
- [4] K. Sugihara: Picture language for skeletal polyhedra, Comput. Gr. Image Process., 8 (1978), 382-405.
- [5] T. Kanade: A theory of Origami world, CMU-CS-78-144, Carnegie-Mellon Univ., 1978.
- [6] K. Sugihara: Range-data analysis guided by a junction dictionary, Artif. Intell., 12 (1979), 41-69.
- [7] 大島正毅・高野善雄: 3次元物体認識のための特殊ハードウェア, 電総研彙報, 5 (1973), pp. 493-501.
- [8] F. Kimura and M. Hosaka: Program Package GEOMAP --- Reference Manual (Preliminary Version), Electrotech. Labo., Tokyo, 1977.
- [9] 杉原厚吉: 多面体線画の代数的解析法, 信学論文誌, 62-D (1979), pp. 201-208.