

- (a) 関数  $d(x, y) = 1/Z(x, y)$  に関して  $e_s + \lambda e_c$  を最小化するオイラー方程式を導け. ヒント: 全体の“誤差”が6個の剛体運動パラメータにも依存することを思い出そう.
- (b) なめらか拘束項の選択に対する理論的根拠を示せ. つまり, なぜ,  $1/Z$  を含んでいて  $Z$  を含まないのか. なぜ, 1階微分の2乗和でなく, ラプラシアン<sup>2</sup>の2乗を用いるのか.

17-12  $\mathbf{R} = (X, Y, Z)^T$  をある物体上の点を指すベクトル,  $\mathbf{r} = (x, y, f)^T$  をその点に対応する画像上の点を指すベクトルとしよう. さらに,  $E_r = (E_x, E_y, 0)^T$  を空間的明るさ勾配,  $E_t$  を明るさの時間微分とする.

- (a) 剛体運動の場合について, 明るさの空間および時間微分に関する拘束条件は次の形に書かれることを示せ.

$$E_t - (\mathbf{s} \times \mathbf{r}) \cdot \boldsymbol{\omega} + \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{t}}{\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}} = 0$$

ここで,  $\mathbf{s} = (E_r \times \hat{\mathbf{z}}) \times \mathbf{r}$  である. ヒント: 投影の方程式  $\mathbf{r} = \mathbf{R}/(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}})$  を使って  $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{R}$  の時間微分が次の関係にあることを示せ.

$$\mathbf{r}_t = \frac{1}{\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}} (\hat{\mathbf{z}} \times (\mathbf{R}_t \times \mathbf{r}))$$

次に, 剛体運動の方程式  $\mathbf{R}_t = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R} - \mathbf{t}$  と明るさ一定の仮定, つまり,  $E_r \cdot \mathbf{r}_t + E_t = 0$  を使え.

- (b) 特殊な場合である平面  $\mathbf{R} \cdot \mathbf{n} + 1 = 0$  の場合に拘束方程式を求めよ.
- (c) 一般の表面の場合に, 奥行き  $Z(x, y) = \mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}$  に対してこの拘束方程式を解け.

運動パラメータ  $\mathbf{t}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$  のいかなる値の組が与えられても, 拘束条件を満足する表面  $Z(x, y)$  が計算できる. しかし, もし, そのパラメータがその時間的に変化する画像を生成している運動のパラメータに対応していないと, 求められた奥行きの値は正でないかもしれない. したがって, 問題は, 拘束方程式から計算された奥行きが画像中のいたるところで正であるパラメータを求めることである. 実用的には, 明るさ計測に含まれるノイズのために, 正しい運動パラメータに対しても計算された奥行きが負であるような場所が存在すると思われる. そこで, この問題を最適化問題に置き換える.

- (d) 次式を最大にする運動パラメータ  $\mathbf{t}$  および  $\boldsymbol{\omega}$  の値の組を求めよ.

$$\iint \text{sgn}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{t}) \text{sgn}(E_t - (\mathbf{s} \times \mathbf{r}) \cdot \boldsymbol{\omega}) dx dy$$

ここで,

$$\text{sgn}(Z) = \begin{cases} +1, & Z > 0 \text{ の場合} \\ 0, & Z = 0 \text{ の場合} \\ -1, & Z < 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

である. 警告: これは, 研究プロジェクトである. 我々は, (まだ) この問題に対する解答を知らない.

## 部品の取り出し (ピンピッキング)

本章では, 今まで述べてきたいくつかの手法をまとめ, 完全なハンドアイシステムを構築する. ここでは, ロボットの“アーム(腕)”はカメラという“目”により得た情報を使い, 物体の山の中からある対象物を取り出すことを目標とする. このような閉ループシステムによってマシンビジョンアルゴリズムの興味深い検証法を実現することができる. もしそのシステムが, 視覚情報を使って取り巻く環境と首尾よく相互作用することができれば, おおよそ, そのマシンビジョン部分はうまく働いているだろうと判断できる. これは画面上にグラフィックスという形で結果を表示するのに比べると, ずっと満足のゆく検証法である. ちなみに, グラフィックスを用いたのでは, 実際には実行されていない作業をあたかもシステムが実行できたものと人間が勝手に信じてしまうおそれがある. これは, 人間自らがもっている驚くべき視覚機能と頭脳を駆使して, 表示された情報を都合よく集約してしまうことによる.

部品の取り出しという問題に取り組むもう1つの理由として, 実用的な必要性が挙げられる. 産業用ロボットが広く導入されないのは, 整列された部品しか取り扱えないという問題が残されているからである. 人手による組立過

程では、部品はしばしば部品箱の中に乱雑に入れられたまま供給されるが、現状の自動組立工程では、部品をきちんと制御された位置・姿勢で供給する装置が必要である。本章では、マニピュレータを用いて部品の山から一度に1つの対象物を取り出す際に、マシンビジョンの結果をどのように利用できるかを示す。

理論を実用に供することは、いつにおいても興味深いことである。その過程においては、最初はそんなに重要でないと思われる細かな部分にも多くの努力が費やされるに違いない。たとえば、画像投影が直交投影でないとか、照明が無制限でないとか、画像センサが一様な感度をもたないといったことを取り扱わなければならない。本章に書かれているような実現上の努力からは、常に何かを学ぶことができる。本章ではこれらのいくつかについて言及する。

### 18.1 方法の概要

取り出そうとする物体の姿勢は、可視表面小領域の向きへのヒストグラム(方向ヒストグラム)により決定される。ここで、表面の向きは複数の画像に照度差ステレオを適用することにより決定される。この処理に用いる画像は、異なる照明下で同一のカメラにより撮影する。処理の結果として、画像の各画素に対応する表面小領域の向きを与える法線分布図(図 18-1)が得られる。

次に、法線分布図を規則的分割された単位球面上に投影し、拡張ガウス像の離散的近似である方向ヒストグラム(図 18-2)を作る。その方向ヒストグラムは、マニピュレータにより操作される物体のプロトタイプモデルから生成された方向ヒストグラムと照合される。そのようなモデルは CAD データベースから作ることができる。この方法では、物体の形状をあらかじめ記述しておく必要があるが、ある種の物体に対象が限定されるということはない。

### 18.2 動機づけ

マニピュレータは、荷積み、バリ取り、溶接、塗装、および包装といった作業に頻繁に使われつつある。しかし組立作業には、あまり使われてはいない。その1つの理由は、マニピュレータが教えられた一連の動きをまさに繰り返すだけだからである。視覚機能をもたないロボットでは、部品の位置に関する不確実性に対処することが難しい。すなわち、産業用ロボットが予測する正確な位置に部品を置くためには、部品供給機構や固定機構が必要となる。

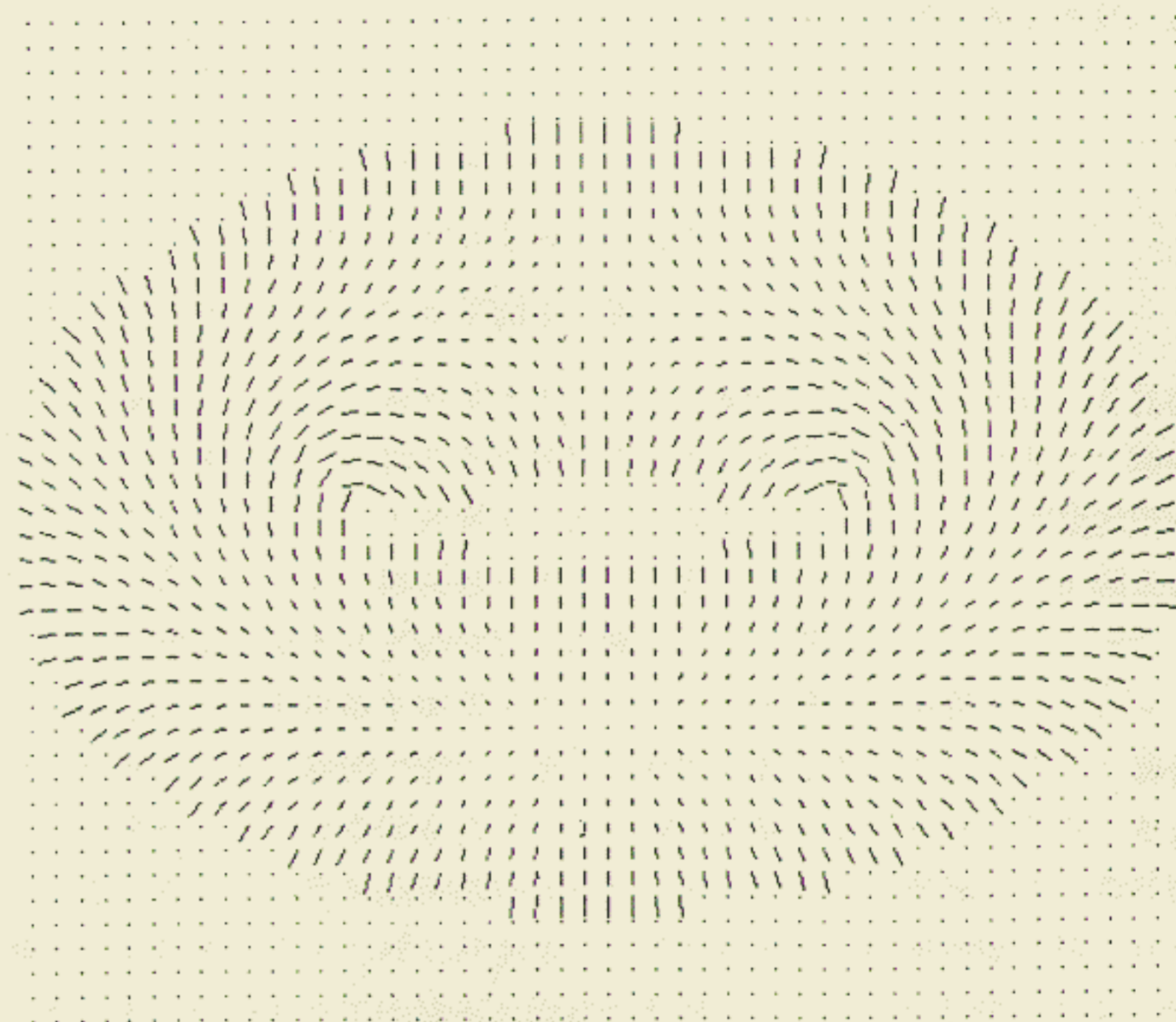


図 18-1. 照度差ステレオ法やその他の方法で得られた表面の向きに関する情報は、法線分布図として表現できる。ここで示したのは、照度差ステレオ法で得られた傾いたトーラスの法線分布図である(この図は Katsushi Ikeuchi 氏により提供されたものである)。

本章で述べるシステムは、部品の山の中にある部品の位置や姿勢を電子カメラで撮影した2, 3枚の画像を用いて決定する。その結果は、マニピュレータでその部品をつかみあげるのに使われる。また、システムは、内部に蓄積されたモデルを用いて、どのモデルが観測されたかを識別することができる。ここで、モデルは、円筒形状や回転体に限定されない。さらに、本質的には任意の位置に置かれた面光源を扱うことができ、物体も特殊な反射特性をもつ必要がない。既知形状の物体を用いた較正により、システムはこれらの2つの変量に適応することができる。また、マニピュレータとカメラの座標系間の変換を決定するためには、別の較正が行われる。

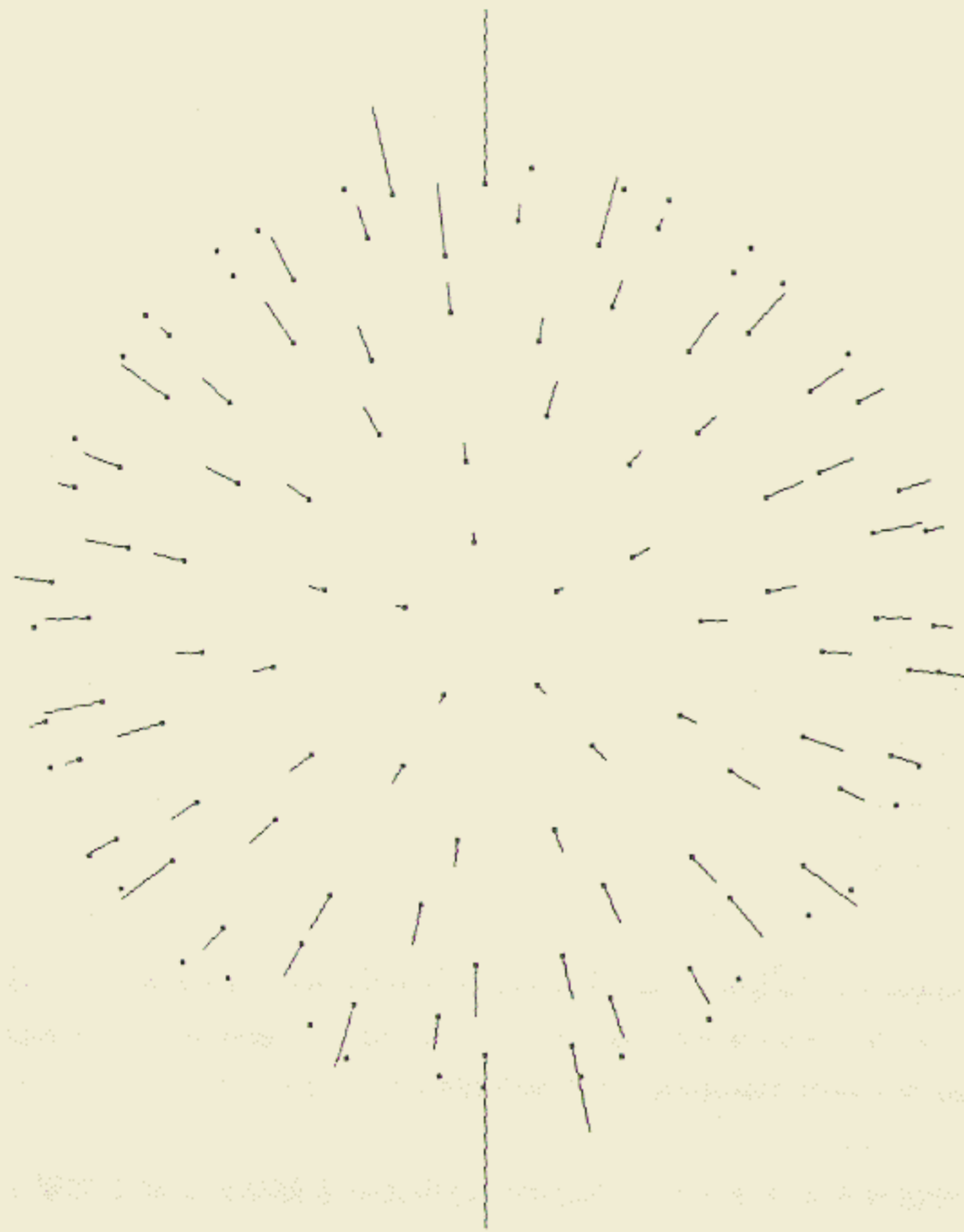


図 18-2. 方向ヒストグラムはスパイクの集合で表現される。スパイクの長さは、球面の規則的分割 (tessellation) の各セルに含まれるカウントに比例している。ここで示したのは、トーラスの法線分布図から得られた方向ヒストグラムである。頂上と底近くにある比較的長いベクトルはトーラスの軸方向に対応している。拡張ガウス像はここに特異点をもつ。

### 18.3 部品の取り出し

手作業による組立では、作業台の回りの部品箱に構成部品が置かれているのがふつうである。自動組立工程においては、マニピュレータが部品の入れ物まで到達し、さらに部品を取り出すための情報を与えるのに、マシンビジョン技術

を用いるのが自然であろう。すでに、2値画像処理手法は、工場で使われている。しかしながら2値画像処理手法を用いるには、前に述べたように、以下の条件が必要である。

- 物体と背景の間に強いコントラストがなくてはならない。
- 部品は1つずつ分離して存在しなければならない。
- 回転運動は画像面に平行な平面上に限られる。

これらの条件は、ここで考えようとしている場合には成立しない。これに対する自明な解決策として、初めから部品を乱雑に配置するのではなく、製作時に正しい向きに配置することが考えられる。現在では、こうした方法が用いられる傾向にある。部品が、搬送器にきちんと置かれたり、パレットに固定される場合は、計測を必要とせず機械的に位置合わせが可能となる。

しかし、この解決策を実現するにはコストが伴う。搬送器やパレットは、しばしば厳しい誤差範囲で設計、製作されなければならない。多くの場合、パレットは重く、大きな空間を占め、また部品を修正するたびに設計しなおさなければならない。自動部品供給機構に合わせるために、部品自体の設計変更を余儀なくされることもしばしばある。いずれにせよ、作業空間が限られていることにより、伝統的な手作業から脱却できないでいるような状況がまだ多い。

この問題の機械的操作による解決策を見出すために多くの試みがなされてきた。多くの場合、注意深く設計された選択機構から部品を振動しているボウル内に投入し、部品の方向を正して供給台に出すことが可能である。この方法はネジや円筒形の部品にとくによく適している。しかし、すべての部品がこの方法で扱われるわけではない。大きく重い部品や複雑な形状をもつ部品は、この方法では処理できない。電磁石や真空吸着機構をもつロボットアームの利用もあるが、限られた解決策でしかない。

今までのこの領域では、マシンビジョンは水平面に置かれた金属製の円筒形部品に対して適用されているだけであった。この種の物体では、研磨によって、光を特殊な性質で反射する細かい溝ができる。これを点光源で照らすと、画像上に円筒の軸に沿ったハイライト部分が現われることからマシンビジョンによる方向検出が可能である。取り出した部品の向きを完全に合わせるのには、傾斜させたメカニカルシュート (投下装置) を利用することができる。し

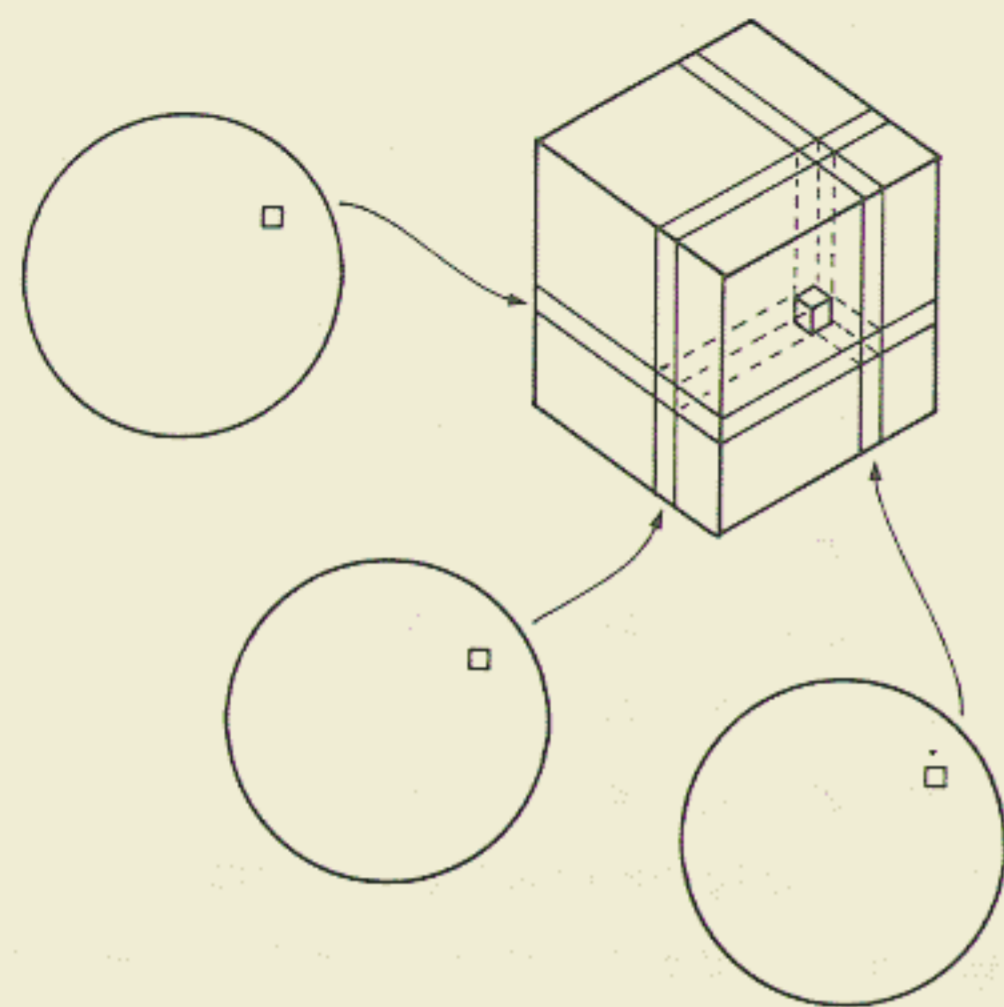


図 18-3. 照度差ステレオ法では異なった照明条件下で同一のカメラから撮影した3枚の画像を使う。3枚の画像上の対応する量子化された明るさを表わす画素値が、3次元の参照表のインデックスとして使われる。参照表上で空白となる画素は、背景に割り当てられる。これらの画素は、画像を各物体に対応する領域に分割するのに、大変重要である。

かしながら、振動しているボウルを利用する方法でも円筒形の部品の方向調整が可能なので、この投下装置による方法はあまり実用に供されていない。

## 18.4 領域分割

ここで述べるシステムでは、視野内の物体の表面形状に関する情報を得るために照度差ステレオを用いる(図 18-3)。照度差ステレオで計算された表面の向きを表わす法線分布図は、蓄えられている物体のプロトタイプと照合される。

拡張ガウス像を扱うためにこれまで開発してきた手法を適用するためには、前処理として、各物体に対応する画像領域の分割を行う必要がある。マシンビジョンにおける難しい問題の1つとして、異なった物体ごとに画像を領域分割するという問題がある。これが実行されたときのみ、個々の物体を認識し、その姿勢を決定する手法を適用できる。そこで、いかなる状況においても有効な領域分割法を、いくつかの方法を融合して作り出すことにしよう。まず最初に、照度差ステレオにより疑わしい点に印を付ける。参照表のたいていの

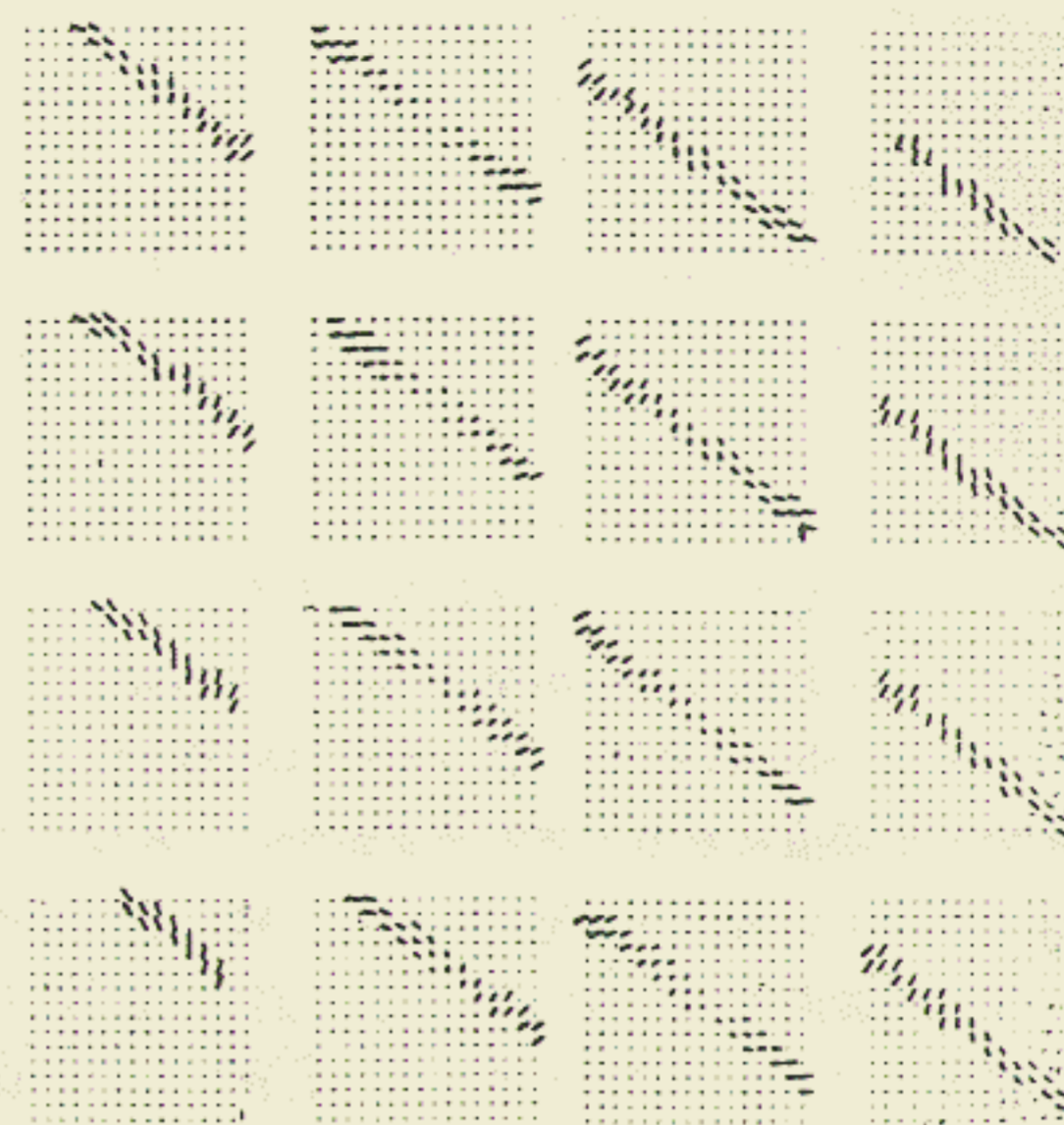


図 18-4. 3つの明るさに基づく参照表のほとんどの欄は空白である。この空白の欄は、表面が一樣の反射率をもつと仮定すると起こりえない明るさの組合せに対応している。ここでは、参照表の各層を並べて示した。表の各欄は、ある明るさの組合せとして記録される表面の向きを示す小さな法線ベクトルもしくは、“不合理な”組合せに対応する空白を示す点として表わされる。

欄は実際には空白である(図 18-4)。空白の欄は“不合理な”明るさの組合せを表わし、このような組合せは影や相互照明の影響がないところでは起こりえない。表面の向きは2自由度しかもたないので、意味のある明るさの組は3つの明るさを軸とする3次元空間中に2次元の面として分布する。実際には、測定時のノイズ、量子化誤差、表面反射の限られた変動を許すため、分布面がある有限の厚さをもつ層になるように参照表を作る。

物体は、互いに影を落とす。その結果として、影のかかっている物体上の点は、影のないときの明るさとはまったく異なった明るさをもつ。したがって、表面の向きを間違えて計算しないように、この状態を見つけ出さなければならぬ。影を見つけ出す粗い方法として、3つの明るさのそれぞれに対してのしきい値を利用する方法がある。ここで、ついでながら、我々が取り扱うべき部品の山の一番上にある部品は、多くの場合、影の影響を受けないことを注意しておく。

他の問題として相互照明や相互反射がある。すなわち、高い反射係数をもつ物体が向かい合うとき、一方の反射光が他方をより明るく照らす。そして影の場合と同様、直接光源から照明されているときには起こりえない明るさの組が生じる。表面の向きを誤らないためには相互照明を見つけ出すべきである。しかし幸いにも、問題となる点は物体のエッジ付近や、物体が他の物体を隠す境界線付近に生じやすい。

次に、ある物体が他の物体を隠すようなところでは、たいてい表面の向きの不連続が生じることに注意しよう。すなわち、まず、表面の向きが急激に変化するところをさがす。これはなめらかな表面からなる物体に対してはうまくいくが、鋭いエッジをもつ物体の場合、誤った領域分割を生じうる。最後に、法線方向が視線に対して垂直になるところをさがす。これは、多くの場合、ある物体が他の物体を隠しているエッジ付近にある。残念なことに、鋭いエッジをもつ物体では、視線が表面に接しない(すなわち表面の接線方向とならない)部分においても遮蔽エッジを生じることがある。しかし、この場合には、表面の向きの不連続がエッジ検出の手がかりとなるはずである。

以上で述べた領域分割の手がかりは、すべての物体が分離されているかどうかを確かめるのに利用できる。領域分割の過程では、観測者に対して45度以内の法線方向をもつ表面小領域のみを物体領域として考えると都合がよい。このやや強引な方法により、考慮対象として残る物体領域の面積はかなり縮小される。これは後に、2値画像手法としてよく使われる拡大処理を行うことで修復できる。場合によっては、視線方向に対して傾斜角が大きい物体面は、この処理のために分断されてしまう。しかしこれは、ここで述べる応用例に関しては、たいした問題ではない。なぜならば、いかなる場合でも視線方向に対して傾きの大きい物体はつかみあげにくいからである。このような場合は、他の物体に注目するほうがよい。

図 18-5a に、ドーナツ形物体の山のシーンに対する法線分布図を示す。図 18-5b に、領域分割に使われる2値画像を示す。この2値画像は今まで述べてきた法線分布図により得られたものである。

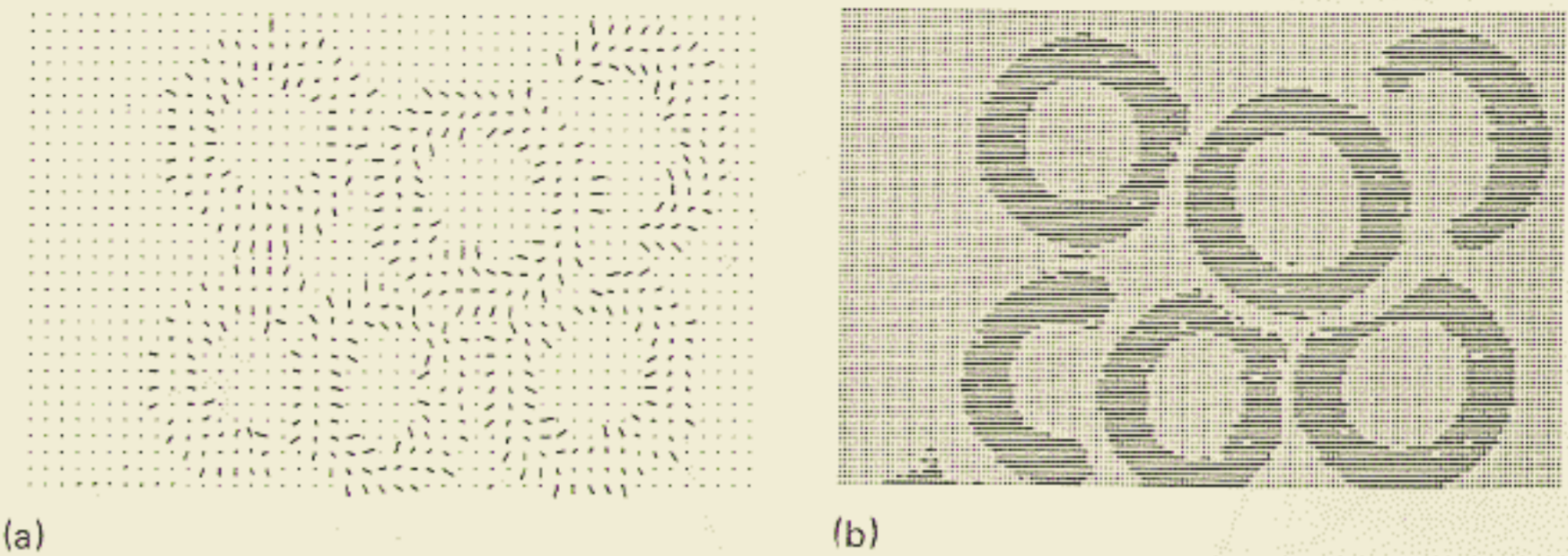


図 18-5. 法線分布図の情報は、画像をそれぞれの表面に対応する領域に分割するのに役立つ。(a)は、ドーナツ状の物体の山の法線分布図を示す。(b)は(a)より得られた2値画像で、領域分割に利用される。図は両方とも、法線分布図中の法線ベクトルが見える程度に大きくなるように、解像度を粗くして示してある。

## 18.5 プロトタイプ物体モデル

未知物体を認識したり、空間中でのその姿勢を決定するには、物体の写った画像から得たデータと、記憶されているモデルから得たデータを比較する必要がある。プロトタイプとして与えられた物体の方向ヒストグラムを決定するには16章で概説したアプローチを利用できる。表面 $(x, y, z)$ は2パラメータ $u, v$ の関数で表現される。ここで、 $u$ の定義域を $n$ 等分に $\delta u$ 間隔で、 $v$ の定義域を $m$ 等分に $\delta v$ 間隔で分割する。これは、事実上、表面を表面小領域に分割することである。次にその小領域を系統的にたどっていき、法線方向を計算する。そしてその単位法線に対応するガウス球面上のセルの値をカウントする。ここで、画像情報から得られるものと異なり、プロトタイプとしての拡張ガウス像は全球面にわたり求められることに注意してほしい。

## 18.6 表面の投影ひずみ

蓄えられたプロトタイプとしての拡張ガウス像は、法線分布図から得られる拡張ガウス像との比較に使われる。画像上で画素はすべて同一の面積をもつが、物体表面上の対応する小領域はすべて同じ面積というわけではない。これは、画像を均一に標本化していることから一見、奇異に見えるかもしれない。しかし、表面をそれに対して垂直な方向から見ない限り、対応する表面小領域には投影ひずみが生じる(図 18-6)。ここで、表面の法線方向が既知であるか

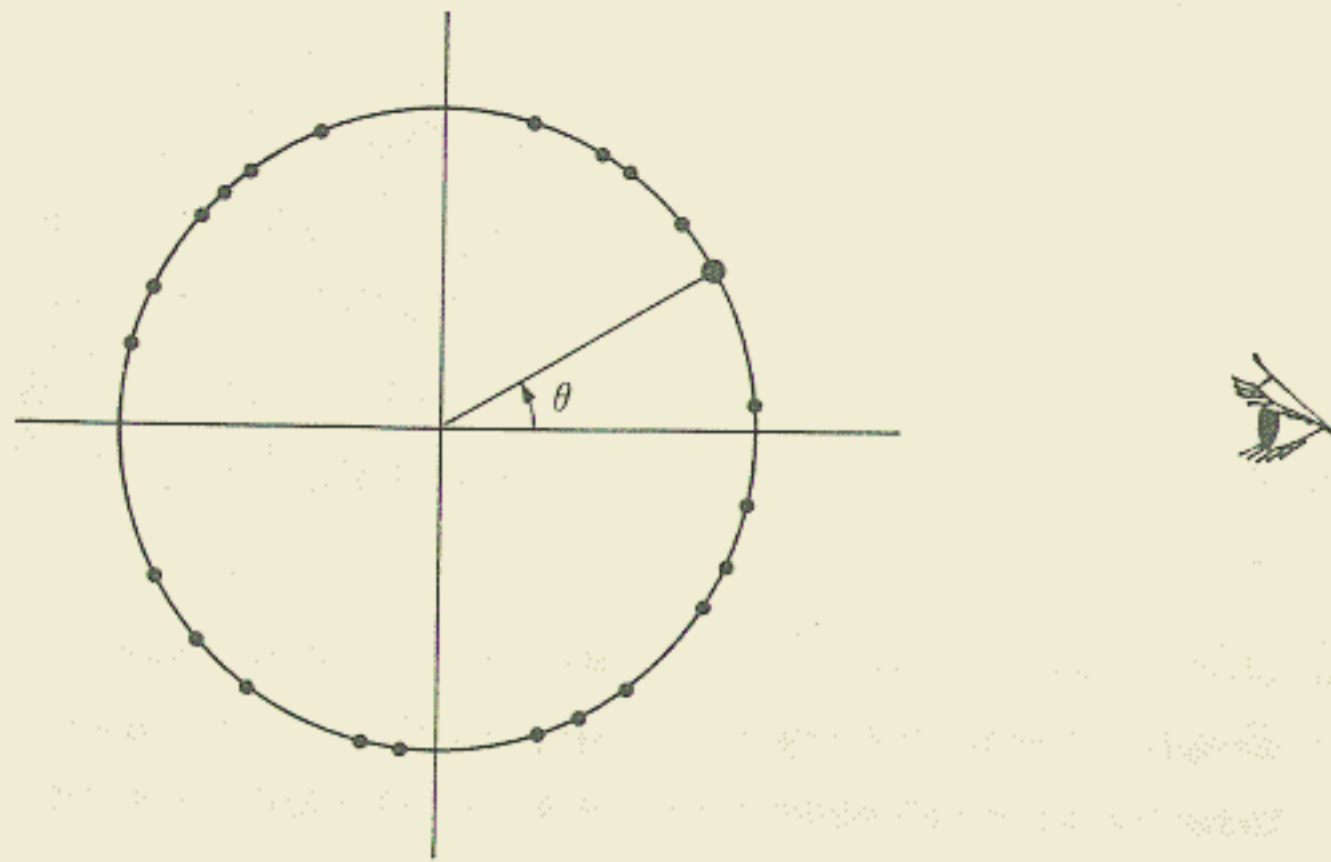


図 18-6. 表面小領域の法線方向と平行な方向から見ない限り、表面小領域の見かけの面積は実際のものより小さくなる。したがって、あるセルに対応する方向をもつ画素が表面上で見つかったときに、そのセルのカウントを単純に増やしていくことにすると、視線方向から離れた傾きをもつ表面小領域に対応するセルのカウントは少なめになる。しかしながら、規則的分割の各セルに対して方向が既知であるから、この影響を考慮することは容易である。

ら、視線方向と法線方向の差の余弦で見かけの面積を割ることによりこの影響を補正することができる。しかし、残念ながらこの補正には視線に対してほぼ垂直な法線方向をもつ表面小領域の測定誤差が増大するという影響がある。それゆえ照合の際、プロトタイプとしての拡張ガウス像に余弦をかける方が望ましい。

ここで、実際の面積はカメラの性質と物体までの距離が既知であるときのみ計算できることを注意しておく。照度差ステレオ法では、距離に関する情報は得られない。この場合、物体の絶対的な大きさも得られない。拡張ガウス像では全球面上で体積に関して正規化を行っており、その結果が照合に用いられる。当然のことながら、同じ形状で異なった大きさをもつ物体を区別することはできなくなる。

画像から得られた拡張ガウス像を用いる場合のさらに難しい問題として、可視表面の半球に関する情報しか得られないということがある。視線との方向差が90度以上ある法線をもつ表面は見えない。実際のところ、多くの場合、照度差ステレオ法の限界から、もっと小さな角度、視線方向との差が60度以

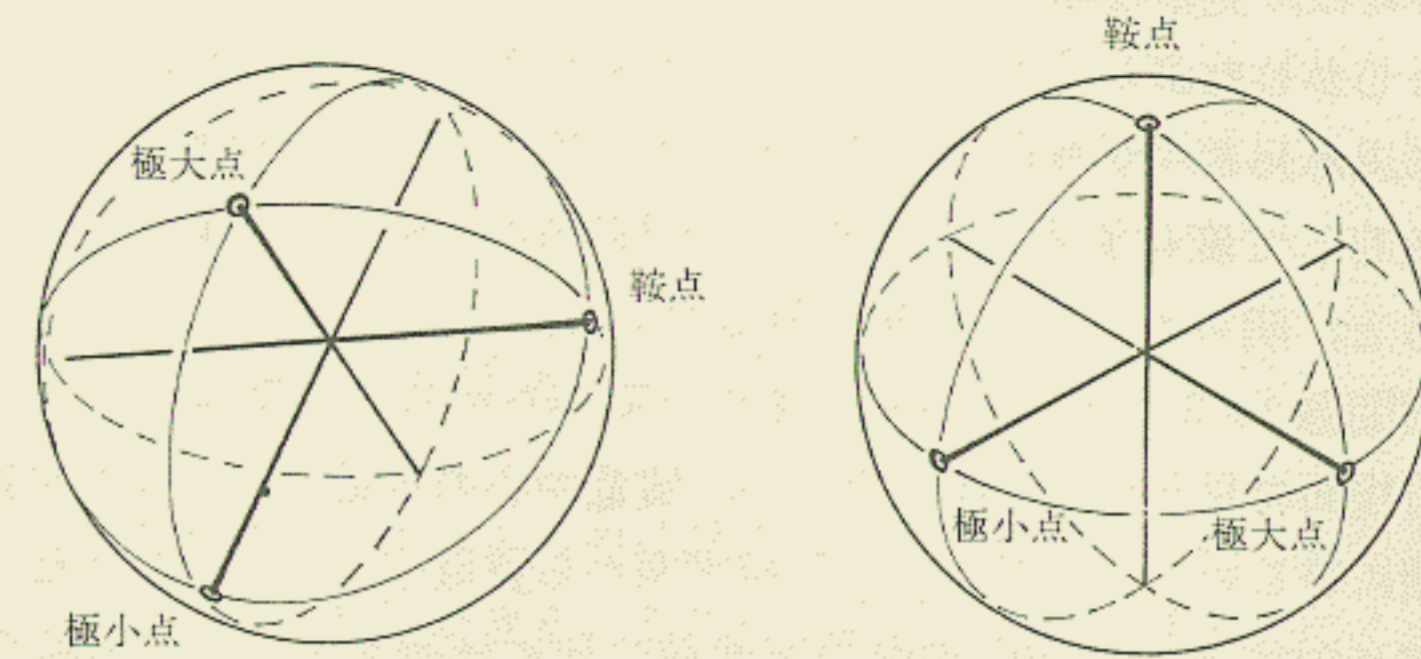


図 18-7. 質量分布の慣性モーメントは、モーメントを計算するための軸の取り方に依存する。慣性モーメントに関しては、極大点、極小点、および鞍点の3種類の停留値 (stationary values) がある。これらの極値に対応する軸方向は主軸と呼ばれ、互いに直交する。相対的に回転した2つの質量分布は、主軸方向を合わせることで一致させることができる。

内程度の表面に関する情報のみが得られる。いくつかの自明な拡張ガウス像照合法は、全球面上の情報が既知のときにしか利用できない。

## 18.7 モーメントの計算

ガウス球面上における質量分布 (mass distribution) の慣性行列を求めることは難しくない。ここで、1次および2次モーメントを求める必要がある。回転は慣性行列の対角化により求められる。回転後の座標系の座標軸は主軸 (principal axis) と呼ばれる。同じ物体の2つの拡張ガウス像間の回転は、主軸を一致させるのに必要な回転を計算することで求められる (図 18-7)。これは、まさにプロトタイプに対する物体の相対的な姿勢を直接計算するアルゴリズムである。この手法は物体の対称性が強く主軸が一意に決まらないときのみ失敗する。これは結局、 $3 \times 3$  行列の固有ベクトルを求めるだけのことであり、言い替えれば、3次方程式の解を求める必要があるだけである。

しかしここでは、そのようなエレガントな手法は用いない。なぜなら、実験により求められる方向ヒストグラムは、球面上の一部だけだからである。さらに、照合においては投影ひずみを考慮しなければならない。しかしながら、モーメント計算に基づく手法をすべて投げ出す必要はない。

たとえば、完全な拡張ガウス像の質量中心は常に原点であることがわかっている。しかしながら、この事実を照合処理に利用することはほとんどできないように思われる。すなわち、可視半球の拡張ガウス像の質量中心は、物体の姿勢に依存して変化するためである。可視半球と不可視半球を分離する平面を考えると、明らかに可視半球の質量中心は、この平面よりいくらか上になる。演習問題 18-2 で示すように、その平面からの高さで質量中心での質量の積は、可視面の見かけの面積に等しい。質量中心の質量はちょうど可視面の実際の面積に等しい。したがって、分離平面から質量中心までの高さは、見かけの表面積に対する可視面の実際の表面積の比に比例する。多くの場合この比は、視線方向によって変化する。さらに、質量中心の側方へのずれは空間中での物体の姿勢に依存する。

可視半球の質量中心によって、物体の姿勢を一意に定めることはできないが、これを照合のための計算量の削減に利用することはできる。照合を高速化するため、物体全体に対する拡張ガウス像と考慮すべき視線方向の集合に対して、質量中心を前もって計算することができる。この計算に使われる離散的な視線方向としては、便宜上、ガウス球面上の各セルの方向が使用される。照合の際、質量中心が大きくかけ離れている視線方向については、それ以上に詳細な検査の必要はない。

## 18.8 凸形状でない物体

凸形状でない物体には、以下の3つの問題がある。

- ガウス曲率が負となる点が表面上にある。
- 物体表面上の2点以上の点がガウス球面上で1点となる。
- 物体の一部が他の部分を隠す。

ガウス曲率の正確な定義には、物体表面上とガウス球面上の対応する小領域の境界をたどる方向が考慮に入れられる。凸点ではガウス曲率は正であり、境界は同じ方向にたどられる。もし鞍点のように2つの向きが逆方向になるとき、ガウス曲率は負と考えられる。拡張ガウス像の近似計算のための簡単な局所処理を解析することにより、拡張ガウス像の定義がガウス曲率の絶対値の逆数として表わせることがわかる。

拡張ガウス像の近似を得るための局所処理を検討すれば、物体表面上の2点以上の点がガウス球面上で1点となる事実をどう扱うべきかがわかる。すなわち、物体上の対応する点のガウス曲率の絶対値の逆数を単純に足し込むだけである。もしそのような点が  $n$  点あれば、

$$G(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{|K(u_i, v_i)|}$$

となる。この考えはさらに、1つの曲線上もしくは領域内で同じ方向をもつすべての点を扱うのにも利用できる。これらの場合、ガウス球面上にインパルス関数が得られる。

物体が凸形状でないとき、物体からガウス球面上への写像は不可逆である。したがって、結果として無数の非凸形状物体が1つの拡張ガウス像に対応することがありうる。しかしながら、典型的な応用例では、同一の拡張ガウス像をもつ異なる物体に出会うことはまずないと考えられる。

遮蔽は、さらに難しい問題である。物体内の複数部分が一直線上に並んでしまうようないくつかの視線方向を除いては、多くの場合、遮蔽は大した影響を及ぼさない。遮蔽に対処する1つの方法として、考えられる各視線方向に対し、異なる拡張ガウス像を作ることにより、遮蔽を考慮することが考えられる。すなわち、可視表面小領域からの影響のみを足し込むのである。便宜上、この計算に使われる離散的な視線の組は、ガウス球面上のセルを通る方向になるように選ばれる。このために記憶容量はかなり多く必要となるが、もう照合において、遮蔽の影響に悩まされることはない。

## 18.9 空間中での姿勢

物体の空間中での姿勢とは、ある基準に関する相対的な回転と考えることができる。その姿勢を決定するために、物体の拡張ガウス像とプロトタイプの拡張ガウス像が照合される。この処理がいかに行われるかを説明するには回転体の場合を例に取るのが一番簡単である。

回転体はある軸の回りに母線を回転することで得られる。明らかに結果としてできた物体は、軸対称となる。このとき、軸の回りの回転は決定できないので、軸の方向を得られれば物体の姿勢が完全に決定できたことになる。その軸は単位ベクトル、もしくは球面上の1点として得られ、それゆえ2自由度を

もつ。軸はまた、画像面となす角(天頂角)と、軸の画像面上への投影と基準軸となす角(方位角)によっても表わされる。

回転体の像は軸の投影に関して対称である。したがって、単に、物体の投影に対応する画像領域の最小慣性軸を求めることにより、非常に簡単な計算で1自由度を減らすことができる。しかし、これには前述の2値画像処理の助けを借りる必要がある、物体のシルエットがどれくらいうまく得られるかによってこの処理の精度は左右される。表面の向きを併用すればもっと良い結果が得られる。

軸の可能な方向を空間中に標本化し、物体の拡張ガウス像と各方向の照合を試みることができる。効率化のためには、この空間を均一に標本化することが望ましい。ある部分を他の部分より細かく標本化することは非効率的であり、避けるべきである。このとき半球状の表面に $n$ 点を“均一に”配置する問題が生じる。そこで、点間の最小距離を最大にする配置法をここでは求めよう。

この問題に関してはいくつかの注意事項がある。たとえば、 $n = 4, 6$ , および、20の最適配置はそれぞれ正4面体、正8面体、正20面体の投影として得られることが知られている(図18-8a)。他の2つの正多面体である正6面体、正12面体からは、最適配置は導出されない(正多面体に関しては、拡張ガウス像について論じた16章においてすでに検討した。ここでは、異なる目的に利用したのだが)。

$n = 32$ の場合には、正12面体と、その双対多面体である正20面体の組合せでうまくいくことがわかっている(図18-8b)。残念なことに、最適化に関しては一般的なルールはない。この問題は方向ヒストグラムに関する球の“うまい”規則的分割の問題に関係している。16章では、球の規則的分割については、最終的に測地ドーム(geodesic dome)とその双対多面体を考えた。ここでは、測地ドームにおける3角形を中心、もしくは等価的に、その双対多面体の頂点を選ぶことで適切な配置を得る(図18-8c, d)。

これらの物体の軸方向のおのおのに関して、詳細な照合は必要ない。質量中心が適度にうまく照合する方向のみ、さらによく調べる必要がある。これは、実際には拡張ガウス像の完全な照合は、ほとんど行う必要がないということの意味する。拡張ガウス像により、最もよく照合された軸方向が、実際の回転体の軸方向であると考えられる。

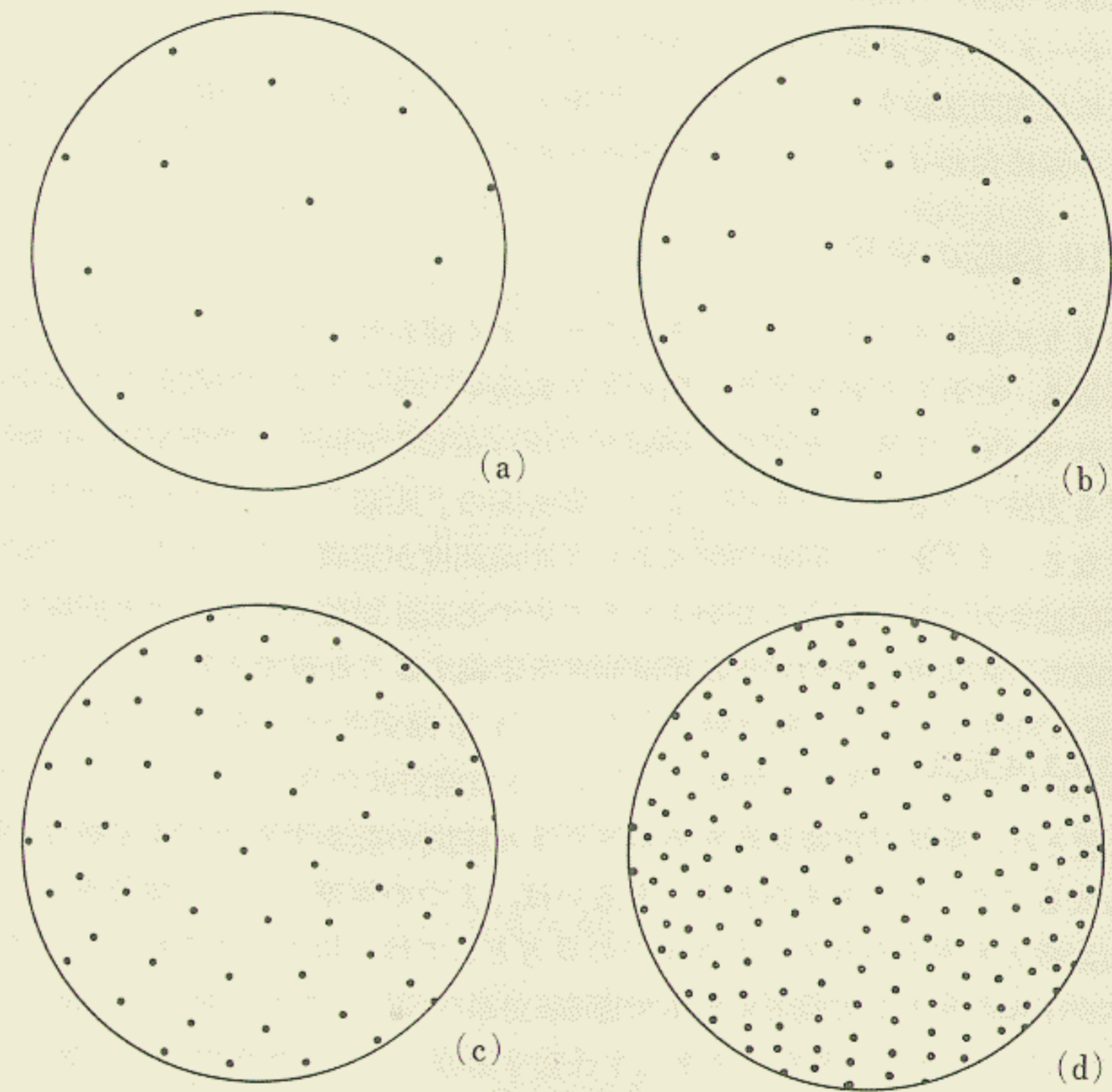


図18-8. 球面上での20点の完全に均一な標本化は、(a)に示すように球面上に正20面体の頂点を投影することで得られる。正20面体とその双対多面体である正12面体の組合せは、(b)で示すように32点の標本化に利用できる。点の数が多くなった場合、その最適配置の方法は知られていない。しかしながら、(c)および(d)で示すように、測地ドームの双対多面体の頂点を使うことでうまくいく。

もう1つの手法は、拡張ガウス像の可視半球上での質量分布の最小慣性軸を決定する方法である。この軸の画像面上への投影は、物体の画像上への投影の対称軸となる。この方法により、非常に少ない計算量で方位角に関する1自由度を減らすことができる。あとは回転体の軸の傾き(天頂角)を知る必要があるだけである。このようにして、探索領域を2自由度から1自由度へ減らすことができる。ここで、最小慣性の軸は実際には、法線を単位球に投影する前



の法線分布図から簡単に計算できることに注意すべきである。1次、および、2次モーメントを計算するのに必要な統計量を計算するのは容易である。この手法には表面法線をガウス球面上に投影する以前に、球面の規則的分割を最小慣性の軸に合わせて行えるという利点がある。

### 18.10 回転の表現

どのように回転を表現すべきであろうか。よく使われるものとして、8つの方法がある。これらにはオイラー角による表現や、 $3 \times 3$ 直交行列による表現が含まれている。しかしながら、必要なのは存在しうる回転の空間を均一に標本化する方法である。そのため、2つの姿勢間の“距離”についての表現法が必要となる。すなわち、回転空間において距離測度が定義できるように、回転空間が記述されなければならないということである。単位4元数により回転を表現することにより、そのような距離測度を定義することができる。

#### 18.10.1 4元数

4元数とは、乗算が定義されたあるベクトル空間の要素である。4元数は4値からなるベクトルと考えられる。あるいは、1つの実部と3つの虚部からなる超複素数とも考えられる。もう1つの見方としては、以下のように、スカラーとベクトルの和として見ることもできる。

$$\dot{q} = q + \mathbf{q}$$

4元数は次のように掛け合わせられる。すなわち、もし

$$\dot{i} = \dot{p}\dot{q}$$

なら、 $\dot{i}$ のスカラー部、およびベクトル部は以下のように定められる。

$$r = pq - \mathbf{p} \cdot \mathbf{q} \quad \text{および} \quad \mathbf{r} = p\mathbf{q} + q\mathbf{p} + \mathbf{p} \times \mathbf{q}$$

乗算に関して、結合的ではあるが可換ではないことは自明である。4元数に関する内積(dot product)は次のように定義できる。

$$\dot{p} \cdot \dot{q} = pq + \mathbf{p} \cdot \mathbf{q}$$

また、4元数のノルムは以下のように与えられる。

$$|\dot{q}| = \sqrt{\dot{q} \cdot \dot{q}} = \sqrt{q^2 + \mathbf{q} \cdot \mathbf{q}}$$

単位4元数は $\dot{q} \cdot \dot{q} = 1$ となり、そのノルムは1である。以下のように $\dot{q}^*$ で表わされる $\dot{q}$ の共役数はベクトル部の符号を反転させることで得られる。

$$\dot{q}^* = q - \mathbf{q}$$

3次元空間における回転は単位4元数により簡便に表わされる。単位ベクトル $\omega$ に関する $\theta$ 回転に対応する単位4元数は以下のように示される。

$$\dot{q} = \cos \frac{\theta}{2} + \omega \sin \frac{\theta}{2}$$

ここで $-\dot{q}$ は $\dot{q}$ と同じ回転を示すことを注意しておく。なぜなら、 $-\omega$ 軸に関する $-\theta$ 度の回転は、 $\omega$ 軸に関する $\theta$ 度の回転と同じであるからである。一方、単位4元数 $\dot{q}$ の共役数 $\dot{q}^*$ は反対方向の軸に関しての同じ角度の回転に相当する。単位4元数の共役数はこのように、単位4元数の逆数でもある。結果として、単位4元数については、以下のようなになる。

$$\dot{q}^* \dot{q} = \dot{q} \dot{q}^* = 1$$

単位4元数は4次元空間の単位球面上の点に相当する。この球面上の直径の両端となる対称点は、同じ回転を表わす。また、等価な表現として、3次元空間中における回転に対応して、4次元空間内の原点を通る直線を考えることができる。

4元数 $\dot{q}$ により示される回転は、次式によりベクトル $\mathbf{x}$ を $\mathbf{x}'$ に変換する。

$$(0 + \mathbf{x}') = \dot{q}(0 + \mathbf{x})\dot{q}^*$$

回転の合成は、以下のように4元数の乗算に対応する。

$$(0 + \mathbf{x}'') = \dot{p}\mathbf{x}'\dot{p}^* = \dot{p}(\dot{q}(0 + \mathbf{x})\dot{q}^*)\dot{p}^* = (\dot{p}\dot{q})(0 + \mathbf{x})(\dot{p}\dot{q})^*$$

単位4元数表現により、しばしば空間内における物体の姿勢を扱う問題を単純化することができる。たとえば、13章において扱った写真測量問題のいくつかも、この表現法を用いて解くことができる。

### 18.10.2 回転空間の一様標本化

ここで、回転空間の一様な標本化の問題は、4次元単位球面上に点を均一に配置する問題と考えることができる。回転空間の一様標本化の問題をここで考えるのは、与えられた数の標本点に関して、その間の最小距離をできうる限り大きくしたいからである。

物体の姿勢を正確に決定したい場合、力づくの照合を方向ヒストグラムに対して行くと、多くの計算量を必要とする。これは、回転空間は3次元であり、処理すべき標本点数は点間の距離の逆数の3乗にのぼるからである。それゆえ回転空間の探索法として山登り法は魅力的であるが、その方法ではあまりうまくいかない。相関値は正しい照合にかなり近づかなければ意味のあるほど上がらないし、相関関数は様々な量子化の影響のため、大変“でこぼこ”しているからである。演習問題 18-8 において、この問題点に影響されない新しい方法を考える。

## 18.11 方向ヒストグラムの照合

2つの方向ヒストグラムの照合は、それらの各セルが対応づけられているならば、いろいろな方法で行える。たとえば、対応するセル内のカウントの差の2乗和を方向ヒストグラム間の相違度としよう。プロトタイプとしての方向ヒストグラム集合のうち、与えられた方向ヒストグラムと最も良く照合するものは、このヒストグラム間の差の2乗和が最小のものである。あるいは別の方法として、対応するセル内のカウントの積の和を類似度とすることもできる。この場合、最大の相関をもつものが最良の照合となる。前者の照合法の良いところは、2乗和の総和が計算の過程で大きくなった場合、完了を待たずに照合の可能性を棄却できる点である。さらに複雑で、しかしながら問題に応じた評価関数を作ることは容易である。

この手法の問題点は、多面体を例に用いることにより最もよく示される。法線方向が規則的分割された球面上の2セル間にある境界上に対応する、ある表面を考えよう。ちょっとした姿勢の違いにより、この法線の寄与は隣合うセルのどちらか一方に集まる。拡張ガウス像はかなり急激に変化し、照合は混乱をきたすであろう。なめらかな曲面に関しては、この問題をかなり軽減できるものの無視することはできない。

この問題の解決策の1つとして、わずかずつ配置の違うセルに各表面の向きを何回かずつ写像することが考えられる。これは、プロトタイプとしてのデータにも実験から得られたものにも施さなければならない。全処理量は、ざらした規則的分割の数をかけたものになる。

表面の向きへの推定に関するノイズにより球面上の分布は平滑化される傾向にある。なぜなら、ノイズにより、あるセルに割り当てられるべき表面法線はその隣のセルへと置き換えられるからである。規則的分割の細かさもこの問題に関係がある。もしセルが大きければ、誤ったセルへ割り当てられる表面法線は少ない。統計的にいえば、各々のセルが大きなカウントをもつほど、ガウス曲率の逆数の平均をより正確に見積ることができるようである。同時に大きなセルでは正確な姿勢決定はできない。逆にセルを非常に小さくすれば、多くのセルのカウントが0ないしは1になるだろう。そのようにノイズが多い分布では照合は難しい。この問題は、有限個の任意抽出標本から2次元確率分布を推定するために2次元ヒストグラムの“適切な”区間幅(bin size)を選択する問題とまったく類似している。

この問題に関しては、エレガントな解法がまだみつかっていない。しかしながら、ノイズの平滑化効果から考えると、照合前の方向ヒストグラムの平滑化を適切に行うことを考慮すべきであろう。与えられたセルに対して、対応セルとその近傍セルの重みづけ平均を照合することで、同等の効果を得ることもできる。この処理によって、ある表面小領域から対応するセルへの寄与は、法線方向の近さに依存して周囲のセルにも分散される。

それでは、物体の軸方向を探すのに、いくつの方向について照合が必要であろうか。これに対する1つの答えが、表面法線が完全には得られないことに注意することにより導かれる。得られた法線方向の精度よりも正確に軸の方向を得ることはできない。別の答えは、ガウス球面の規則的分割の細かさを検討することから導かれる。照合を試みるべき方向は、正しい方向に十分近いものである必要があり、このときほとんどのセルが互いに対応づけられていなければならない。これは、数百以上の方向について試みる必要があることを意味する。しかしながら、拡張ガウス像はこれらの方向のうち、ほんの数個と照合を行うだけでよくなることを思い出そう。なぜなら、残りは重心位置がまったく合わないことから棄却されるからである。

どんな場合においても、実際には、物体の軸方向を約5度から10度の間の精度で得ることができる。これは、マニピュレータが物体をつかみあげる作業には十分な精度である。もし、さらに精度が要求されるならば、その後、機械的な位置合わせ手法を利用すればよい。

### 18.12 法線分布図の再投影

もし、実験により法線分布図から得られた方向ヒストグラムと物体モデルから生成された方向ヒストグラムを比較するのであれば、2つの方向ヒストグラムのセルが対応するように配置しなおすことができる。しかしながら、実験により得られた方向ヒストグラムが回転しているときは、生成された方向ヒストグラムのセルとの対応はもはやとれていないのがふつうである。これは、基準方向において規則的分割された球面に法線を投影する前に、一方の方向ヒストグラムの法線を回転しなければならないことを意味する。拡張ガウス像の再投影は、おそらくモデルから生成されたデータを回転して行う方が都合がよいであろう。なぜならば、あらかじめ回転した結果を蓄えておくことが可能だからである。もし選択した規則的分割が、少なくともいくつかの回転に対してセル配置が変わらないという性質をもつならば、労力をかなり削減することができる。この性質をもつ規則的分割を用いることで照合処理は簡単になる。なぜなら、方向ヒストグラムの回転は各セルのカウントを入れ換えるだけで行えるからである。この性質をもつ規則的分割の選択に注意が払われるのはこの理由による。

正多面体の各面は、それぞれに固有な回転連続群の有限部分群に属する回転に関して配置が変わらない。これらの部分群の大きさは、正4面体、正6面体、正12面体に対して、それぞれ12、24、60である。サッカーボール形状や60面体のような正12面体とその双対多面体による規則的分割は同じ回転群をもつ。サッカーボール形状の場合、以下の3種の回転軸を考えることで、簡単に回転を列挙することができる。

- 5角形セルのうちの1つの中心を通る軸に関して、5重の対称性がある(これは  $(12/2) \times 4 = 24$  種の回転を示す)。
- 6角形セルのうちの1つの中心を通る軸に関して、3重の対称性がある(これは  $(20/2) \times 2 = 20$  種の回転を示す)。

- 最後に、5角形セルのエッジの2等分点に関して、2重の対称性がある(これは  $(30/2) = 15$  種の回転を示す)。

恒等変換を含めると、全部で60種の異なる回転が存在することになる。回転の空間全体にわたり、これ以上の要素数をもつ有限部分群は存在しない。それゆえ、60種以上の回転を扱う場合は、再投影処理が必要となる。

### 18.13 理想的な場合からのずれの修正

今まで述べてきた解析に関して暗黙に仮定していたことのいくつかは、実際の場合には成り立たない。たとえば、表面の明るさは表面の向きにのみ依存し、その位置には依存しないと仮定してきた。これは光源が無遠に存在するときのみ正しい。実際には、光源は物体の表面に十分近く、逆2乗則が働く。この影響は明るさの正規化により除くことができる。まず3種の照明それぞれに関して、一様な白色の表面の画像を得る。明るさの分布を近似するには、典型的な場合、線形近似を用いれば精度の面では十分である。そのうち、画像から得られた  $x$ ,  $y$  座標に関する線形関数を用いて、すべての画像の照明についての不均一性を修正できる。

他にもう1つ、より扱いが困難な問題がある。光源が近くにあるため、表面上のすべての点で入射光線の方向が等しくならないという問題である。これは、表面法線方向が正しく計算されないことを意味する。この影響により生じる誤差は、多くの場合、照明の不均一性により生じるものに比べ小さく、かつ修正が難しいので、ここでは明確な解説は行わないことにする。

完全な画像入力装置はないが、CCDカメラは大変良い幾何学的精度をもち、明るさに対して線形の応答を示す。しかしながら、その素子1つ1つがすべて同じ感度をもつわけではない。シリコン上の欠陥により、いくつかの素子が他のものより弱くなったりする。この影響は、レンズのない状態でカメラの光軸上に置いた点光源を撮影することにより考慮することができる。これにより画像面上の一様照明状態を実現でき、結果としてそれ以降の明るさの測定値を補正することができる。

代替案として、ある画素についての3つの画像上での明るさは、これらの和で割ることで正規化を行うことができる。これによりセンサ応答の不均一

性の影響を取り除くことができ、また照明条件の変動に対処することもできる。さらに物体上の点間の反射係数の違いの影響を受けないようにする効果もある。物体の表面反射率特性はしばしば、完全に一様ではない。多くの場合、そのためにたとえばマニピュレータがうまく部品を扱うことができないなどの不都合が生じるので、この種の実験には修正のためのかなりの努力が必要である。画像入力センサの感度の不均一性に対する正規化は、おのずと表面反射の変動への対策ともなる。しかしながら同時に、これにより、領域分割に役立つ影の部分や相互照明の発見が、より難しくなる。

ときどき、ひどいノイズや画像入力装置の欠陥、表面上のしみ・汚れのため、照度差ステレオ法では画像上の孤立点についての表面方向を求められないときがある。これに対しては、このような孤立点を探し、近傍の表面の向きの平均に等しい法線を与えることで対処できる。わざわざこの処理を行うのは、適当な法線を与えなければ、この孤立点をオイラー数の計算において、穴のように扱ってしまうからである。

11.7.3 項において、ほとんどいたるところで表面方向がなめらかに変化するという仮定に基づく拘束を用いてノイズを取り扱うための照度差ステレオ法を検討した。この変分法を基にした繰り返し法によりひどいノイズに対処できるが、処理は遅くなる。

## 18.14 もち上げるための物体把握

画像をいったん、物体の部品ごとに対応する領域に分割できてしまうと、さらに解析すべき領域を判断しなければならない。選ばれるべき領域は、物体の山の頂上近くになければならないし、できるかぎり隠れた部分が小さいものであるべきである。この必要条件はマニピュレータが簡単に物体をもち上げるようにするためのものであり、またプロトタイプとの照合がなるべくうまく行われることを保証するためのものでもある。もち上げ操作をより簡単にするため、もしくは物体の姿勢をより正確に決定するために、ある種の姿勢の物体を選択するという場合もある。照度差ステレオ法では絶対的な距離情報を得ることができないので、条件にあう物体の選択は簡単ではない。

マニピュレータがつかみあげることができると思われる物体をたくさんの物体の中から選ぶためには、いくつかのヒューリスティックを使わざるを得ない。まず、もし物体に隠れがなければ、画像中の対応する領域は相対的に大き

な面積をもつと考えられる。また、面積に対する周囲長の2乗の比率も画像中の領域の細長さを推定するのに用いることができる。大変細長い領域は、マニピュレータで扱いにくい姿勢に物体があるということを知る手がかりになるかもしれない。最後に、オイラー数もときには適切なヒューリスティックとして用いられる。もしドーナツの軸が視線方向に対してあまり大きな角度をなさないとする、隠れのないドーナツ状物体のオイラー数は0となるであろう。

いったん空間中での姿勢がわかれば、次の課題はその物体をつかみあげることである。システムに、物体表面上のどの点をつかむべきかを明示しなければならない。グリッパは隣接する物体の邪魔をしないように配置されるべきである。この観点では、物体上での比較的高いところを選択するのが良いだろう。この時点では、物体の形状と姿勢が既知であるので、これは実行可能である。また画像中で、解析対象の物体に対応する領域に他の物体の領域が近接して存在する場所は避けるのが賢明であろう。

とくに絶対的な奥行き情報が得られていない場合、いつも物体が計算どおりにつかめるとは限らない。この場合、隣接する物体との衝突や部品把握の失敗といった問題を検出するには触覚センサが役立つ。このような問題が生じたときには、ロボットアームを視野の外に移動させ、やり直すことが最良の方法である。別の自明な問題として、1つの部品がつかみあげられるのに必要な時間が一定でないという問題があるが、これは機械的に部品をバッファリングすることで解決できる。

つかみあげるべき物体がなくなれば、法線分布図は一様になる。解析対象とすべき領域と背景との切り分けが不可能な状態となり、領域分割処理が失敗に終わり、システムの動作が終了する。

## 18.15 ロボットアームの動作

視覚センサの役割に比べ、マニピュレータの制御は相対的に簡単である。つかみあげるべき物体の姿勢を決定するには照度差ステレオと方向ヒストグラムの照合を用いた。注目すべき領域の位置は、その広がり面積中心を見つけることにより推定できる。しかしながら、領域の輪郭はまったくおおまかなものであるため、この2値画像処理手法を用いるべきでない。得られた法線分布図と、物体のプロタイプモデルとその時点で既知である姿勢情報から計算された法線分布図を照合して、より正確な位置を得る方がよい。

注目すべき物体に対応する画像中の領域の位置により、カメラから物体に向かう視線が決まる。照度差ステレオでは絶対的な奥行き情報を得ることができないので、この視線上のどこに物体が存在するかは決定できない。それゆえロボットアームは物体が置かれている平面から十分離れた位置から、その視線に沿って動くよう指示される(図 18-9)。近接センサを使えばロボットアームが物体に近づいたことを検知することができる。たとえば、グリップの一方の指から他方に、変調した赤外線ビームを通すことで、指の間に物体があることを知ることができる。この時点で、物体の姿勢に合わせるように、ロボットハンドの向きを修正することができる。そののちグリップを閉じ、物体をその安定状態からもち上げる。

## 18.16 ハンドアイ座標変換

ロボットアームをカメラから出る視線に沿って動作させるためには、カメラを原点とした座標系からロボットアームを原点とした座標系に変換する必要がある。この変換は6自由度をもち、平行移動と回転で表現できる。カメラの位置、姿勢を直接測定したのでは、十分な精度でその変換を決定することは難しい。ロボットアームをカメラの前の既知の位置をたどって順に動かす方がこの要求にはるかに適している。そうすれば、そのカメラから撮影したロボットアームの画像中の位置を決定し、それを用いて変換パラメータを得ることができる。高い精度を得るために、変換パラメータを得るのに必要な最小個数より多くのデータを観測し、最小2乗当てはめを実行する。

今日ではまだ、ロボットアームを認識し追跡できるプログラムを開発することは大変難しい。このため画像中で簡単に位置検出できるように、実際には測量用マーク(surveyor's mark)を付けたロボットアームを用いている

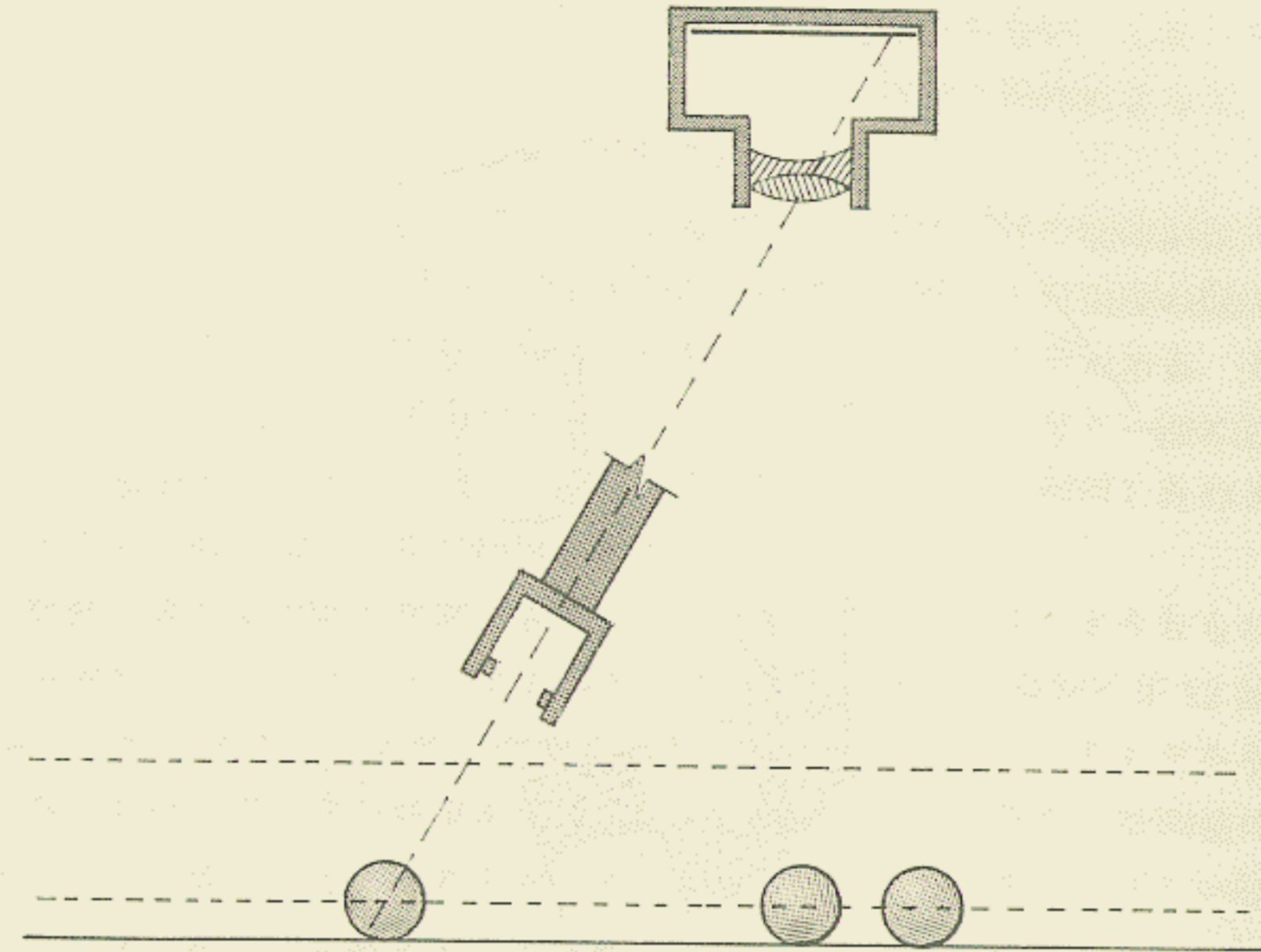


図 18-9. 照度差ステレオでは絶対的な奥行きが得られない。物体の姿勢が既知のときは、その位置はカメラからの視線上に拘束される。ロボットのグリップをその視線に沿わせ、近接センサが物体を感知するまで動かすことができる。そののち、物体がもち上げられるように、マニピュレータハンドの方向を決めればよい。

(図 18-10). これは基本的には  $2 \times 2$  に区切られたチェッカーボードである。明るい部分と暗い部分を分ける2直線の交点は、高い精度で検出できる。

カメラはうまく真下を見るようにロボットアームの上方に取り付けられる。このようにすると、ロボットアームの座標系の2本の軸を含む平面にほぼ平行なように画像面を配置できる。これにより、この2軸を含む平面、もしくはそれに平行な表面について、中心投影が6パラメータのアフィン変換で近似できる。この方法は演習問題 13-12 でよりくわしく検討した。実際には問題を簡単にするために、物体をささえている面の近くの平面上の多くの点を選び、これらの点を通るようにロボットアームを動かすことにより、1つのアフィン変換を決定する。そののち、計画された作業空間の最高点近くの高さにある、カメラに近い平面までこの処理を繰り返す。この方法により、画像中の

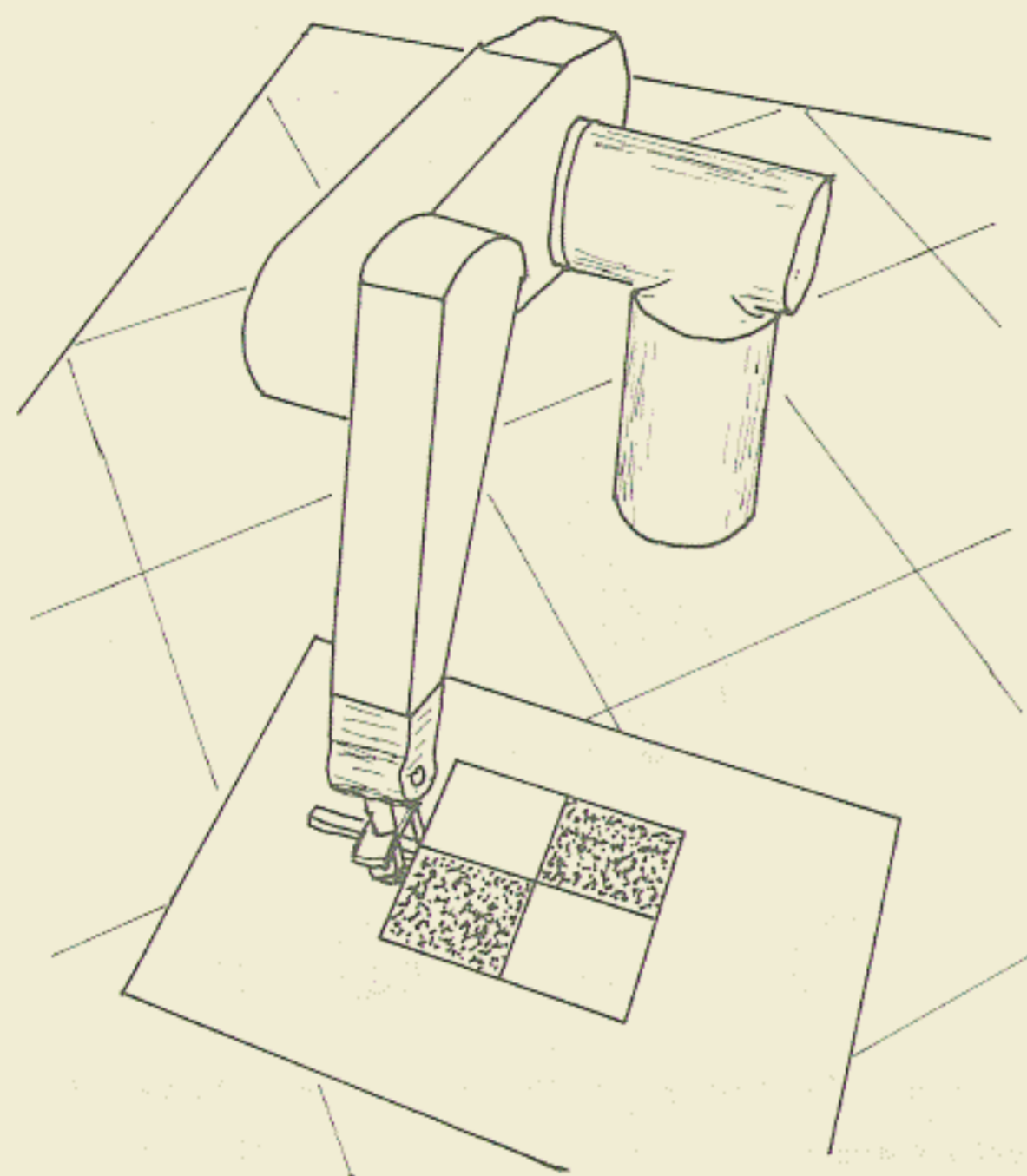


図 18-10. マニピュレータの座標系と、カメラの座標系間の変換は、アームにより把握されている物体が画像上のどこに現われるかを知ることによって得られる。測量用マークはとくに認識しやすい。画像面と地面に平行な 2 平面のそれぞれの間で、アフィン変換を得ることができる。画像上での各点は、これらの平面のうちの 1 平面上の既知点と、他の平面上の既知点をつなぐ視線に対応する。

各点がそれぞれの平面上の点に写像される。このようにして、ロボットアームの動作空間内で視線の位置が決定される (図 18-9)。

### 18.17 任意形状の物体

今まで、物体の形状は回転体に限定して述べてきた。そのような物体については、物体の軸に関する 2 自由度を復元するだけでよい。一般の場合においても、拡張ガウス像を使うことはできるが、姿勢は 3 自由度をもつ。この事実は、たとえば、物体は任意の軸に関して任意の角度だけ回転できるということに注意すれば理解できる。その軸を特定するには 2 パラメータが必要であり、

角度に 1 パラメータが必要である。これは、照合にさらに長い時間が必要となることを意味する。多くの可能な照合を試さなければならない。しかしながら以下で考えるように、今まで述べてきたのと同様の枝刈り操作によって、これらの考慮すべき照合の大部分が直ちに除かれる。

今まで述べてきた方法の簡単な拡張により、回転体以外の物体が扱えるようになる。もう一度、可視半球の質量分布の最小慣性軸を 1 自由度の削減のために用いる。残された問題は、物体を観測している方向の決定である。その方向は、ある球面上の点に限定できる。そこで球面をできるかぎり一様に近くなるように離散的に標本化する。これには方向ヒストグラムに利用したのと同様な、規則的分割を施した球が利用できる。

姿勢を表わす空間を探索するこれらの方法は、山登り法のようなものに比べ非効率的だと考える人がいるかもしれない。たとえば、最初に正 12 面体の 60 種の回転を考えることで、姿勢をおおまかに知ることができるだろう。この処理における最良照合結果を反復過程の初期値として、姿勢の微調整により徐々に照合を修正していくことができるだろう。しかしながら、正しい姿勢に近くなるまで照合はさほどよくなるので、この方法ではうまくいかない。

### 18.18 結論

本章では、山積みの物体を取り出すためのマシンビジョンシステムについて考えてきた。図 18-11 は、そのシステムが作業中に撮影した一連の写真群から選んだものを描きなおしたものである。このシステムは照明を変えた条件下で 1 つのカメラから撮影した複数の画像を使う。これらの画像から、物体の表面小領域の方向の推定値を示す法線分布図を計算する。これは次に、拡張ガウス像の離散的な近似である方向ヒストグラムの計算に使われる。そのうち、この実験により得られた方向ヒストグラムは、計算機上に蓄えられた物体のモデルから得られた方向ヒストグラムと照合される。この方法により、空間中の物体の姿勢を得る。この情報を用いて、マニピュレータを、空間中の物体に向かう視線に沿って動かし、物体をつかむことができる。

ここで述べた実験システムはとくに速くはないが、すべての計算は単純であり、多くは表参照により可能であるため、より速いシステムを容易に構築することができる。照合処理の高速化のために、特殊なハードウェアを作ること

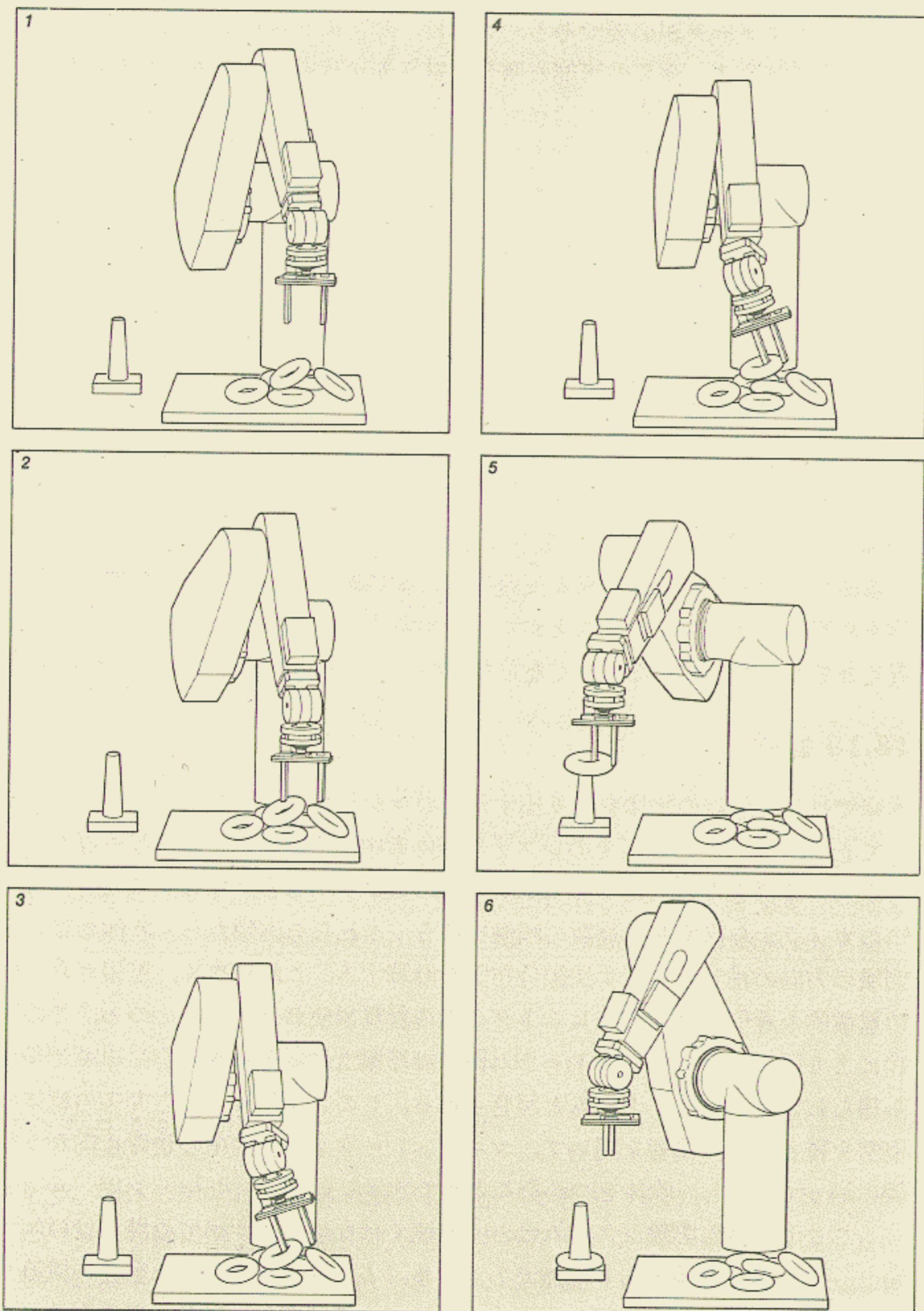


図 18-11. 照度差ステレオシステムを用いて、ロボットアームが次々に山積みの物体をつかみあげる様子を撮影した写真から6枚を選び、それを描きなおしたもの。

もできるだろう。照合は一種の相関演算であるから、ハードウェア化はあまり難しくないとと思われる。

今まで述べてきた手法は、物体認識や物体の姿勢決定としてはロバストなものであろう。たとえば、物体の領域ごとに数千画素を調べることにより得られる特殊な特徴により物体を認識する手法よりも、うまく動作する。特殊な特徴を用いた物体認識では、その特徴を得るためだけに数千点を調べなければならず、すべての物体に対し調べるべき画素数は、格段に多くなる。

法線分布図は、奥行き分布図からその1次微分をとることで、計算できる。それゆえ、ここで述べた方法はレーザー距離計測装置を使って得た奥行き分布図といった他の表面情報にも適用可能である。レーザー距離計測装置はまだ高価で、しかも測定速度が遅いので、ここで報告した実験では使用していない。もちろん、2眼ステレオ法を用いて得た奥行き分布図にも適用できるであろう。

### 18.19 おわりに

本章では、本書で述べてきた多くの手法を統合した。表現と拘束条件の問題について強調してきた。部品取り出しシステムは、簡易なヒューリスティックに頼ることなく、準備を周到に行うことにより、ロバストで実用的なマシンビジョンシステムを構築できることを示している。照度差ステレオ、拡張ガウス像のような概念はいうまでもなく、回転空間の標本化といった概念でさえ、その成功にとって重要である。上述の手法は、マシンビジョンにおける問題に対する新しいアプローチを示している。これは、画像生成過程に対する注意深い物理的解析とマシンビジョンを1つの逆問題とみなす視点に基づいている。しかしながら、まだほんの出発地点であり、研究すべき問題はなお多い。

### 18.20 参考文献

マシンビジョンのロボティクスへの応用は、Dodd & Rossol 監修の *Computer Vision and Sensor-Based Robots*[1979] や、Pugh 監修の *Robot Vision*[1983] の中で検討されている。

多面体に関しては、Fejes Toth の著書、*Regular Figures*[1964] や、Coxeter の著書、*Regular Polyhedra*[1973]、Pearce & Pearce の著書、*Polyhedra Primer* [1978] で議論されている。Hamilton は、*Elements of Quar-*

ternions[1899]の2巻の中で4元数についてくわしく論じている。

部品の山から、もしくは、入れ物の中から部品を供給する手法の開発については、これまでもかなり興味もたれてきた。円筒形の部品に対しこの作業を行うために視覚情報を用いるシステムについては Kelley et al. [1982]で述べられている。部品の向き決定を自動的に行う異なったアプローチが、Bolles, Horaud, & Hannar[1983]で述べられている。この問題を解くために、照度差ステレオ法、拡張ガウス像、回転空間の準一様標本化を利用することは、Ikeuchi & Horn[1984]で最初に報告された。Horn & Ikeuchiによる *Scientific American*の一般記事[1984]にも、その技術の詳細がいくつか説明されている。

13章の最後で述べられている Nishihara[1983]の2値相関ステレオシステムが、その後、このピンピッキングシステムにおいて用いられた。これにより、照度差ステレオ法だけでは求められなかった絶対的な奥行き情報を得ることができた。これは Ikeuchi et al.[1984]により、内部報告中で述べられている。Ikeuchi[1985]は最近、2つの照度差ステレオシステムを使い、複数の法線分布図を照合する新しい2眼ステレオシステムを開発した。最近、Little[1985]は、混合体積の概念を利用することにより、方向ヒストグラムのより良い照合法を開発した。ついでながら、混合体積とは、Lozano-Pérez[1983]により空間的推論およびロボットの行動計画に使われているコンフィギュレーション空間における障害物表現 (configuration space obstacles)のことである。

Salaminによる内部報告[1979]には、単位4元数による回転表現の利点、および、他の表現との関係が明確に述べられている。Taylor[1979]は、ロボットマニピュレータの行動計画作成に4元数を使用した。一方、Canny [1984]は移動する多面体の衝突検出に関する研究を見通しよく進めるために4元数を使用した。

## 18.21 演習問題

18-1 本問題では、プロトタイプとして与えられた物体の方向ヒストグラムを決定する方法を概観する。表面上の点は  $u$  と  $v$  を使いパラメータ表示されているとしよう。  $u$  の定義域を  $\delta u$  の刻み幅で  $n$  等分し、  $v$  の定義域を  $\delta v$  の刻み幅で  $m$  等分する。そして表面小領域を系統的に移動し、方向ヒストグラムに総計を記録する。このためには、それぞれの表面小領域の面積と同様に、法線方向を知る必要がある。

(a) 単位法線ベクトルが以下のように示されることを示せ。

$$\hat{n} = \frac{\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|}$$

ここで、  $\mathbf{r}_u$  と  $\mathbf{r}_v$  は、ベクトル  $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$  の1階偏微分である。

(b) 表面小領域の面積が以下のように与えられることを示せ。

$$\delta O = |\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v| \delta u \delta v$$

18-2 拡張ガウス像の可視半球の質量中心は、可視半球を分離する平面よりいくらか上方に存在するであろう。その平面からの高さに質量中心の質量をかけたものが、観測者から観測できる見かけの面積に等しいことを示せ。また、質量中心での質量がちょうど可視面の実際の面積に等しいことを示せ。

18-3 2眼ステレオ法を追加することにより、ここで示したピンピッキングシステムはどのように変わるであろうか。処理速度、複雑さ、コストを考察せよ。

18-4 2つの照度差ステレオシステムを併用することで、物体の空間中での姿勢とともに、絶対的な奥行きを復元することができるであろうか。この手法を前の問題の手法と比較せよ。

18-5  $\hat{p}$ ,  $\hat{q}$ , および  $\hat{i}$  を4元数とする。以下を示せ。

$$(\hat{p}\hat{q})^* = \hat{q}^*\hat{p}^*$$

$$(\hat{p}\hat{q}) \cdot (\hat{p}\hat{q}) = (\hat{p} \cdot \hat{p})(\hat{q} \cdot \hat{q}) = (\hat{q}\hat{p}) \cdot (\hat{q}\hat{p})$$

$$(\hat{p}\hat{q}) \cdot (\hat{p}\hat{i}) = (\hat{p} \cdot \hat{p})(\hat{q} \cdot \hat{i})$$



18-6 回転は4元数  $\hat{q}$  により表わされる。ベクトル  $\mathbf{x}$  が  $\hat{q}$  で表わされる回転により次式で示されるベクトル  $\mathbf{x}'$  になることを示せ。

$$\mathbf{x}' = (q^2 - \mathbf{q} \cdot \mathbf{q})\mathbf{x} + 2\mathbf{q}\mathbf{q} \times \mathbf{x} + 2(\mathbf{q} \cdot \mathbf{x})\mathbf{q}$$

これを Rodrigues の公式

$$\mathbf{x}' = (\cos \theta)\mathbf{x} + (\sin \theta)\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x} + (1 - \cos \theta)(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{x})\boldsymbol{\omega}$$

と比較せよ。この公式を以下の等価な形に書き換えることにより、算術演算の数を減らせることを示せ。

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + 2\mathbf{q}\mathbf{q} \times \mathbf{x} - 2(\mathbf{q} \times \mathbf{x}) \times \mathbf{q}$$

ヒント: 付録にあるベクトル恒等式を利用せよ。

18-7 単位4元数  $\hat{q}$  の要素を  $q_0, q_1, q_2$  および  $q_3$  としよう。ここで、 $q_0$  はスカラー部分を表わし、 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)^T$  はベクトル部分を表わす。これと等価な回転行列が次式で表わされることを示せ。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(-q_0q_3 + q_1q_2) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_0q_3 + q_2q_1) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(-q_0q_1 + q_2q_3) \\ 2(-q_0q_2 + q_3q_1) & 2(q_0q_1 + q_3q_2) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix}$$

ある正規直交行列が与えられたとき、どのようにすれば対応する4元数を復元できるだろうか。

18-8 本章では拡張ガウス像を照合するのに、相関法に類似した方法を考えてきた。相関法に関しては、これに固有の問題がいくつか存在する。この演習問題では、代替の方法を考えよう。2つの物体  $A, B$  の混合物体  $C = A \oplus B$  は、その拡張ガウス像が  $A$  と  $B$  の拡張ガウス像の和である物体であると定義する。すなわち、 $G_C = G_A + G_B$  とする。今、 $B$  が  $A$  を回転したもの、すなわち  $B = R_{\hat{q}}(A)$  と表わされるものであるとしよう。混合物体の体積は、 $A$  に対する  $B$  の相対姿勢の関数になる。この体積は、 $B$  が  $A$  と同じ姿勢にあるとき、すなわち  $\hat{q} = 1$  のときに最小値となることを示すことができる。混合体積を計算する方法を開発し、それを物体の姿勢決定に利用せよ。ヒント: 演習問題 16-9 の解をモデルとして使え。警告: これは、大変大きなプロジェクトである。

## 付録： 便利な数学的手法

本付録では、本書で用いられているいろいろな数学的手法について簡単にまとめる。まず、平面および球面3角法で有用な公式から説明をはじめ。次に、ベクトル算法のいくつかの側面をまとめる。これにはベクトル方程式の解法とベクトルと行列に関する微分の慣例的記法の説明が含まれる。その次に、線形システムの最小2乗法を説明する。さらに、拘束なしと拘束ありの場合の最適化手法の概説を行う。最後に、変分法について簡単にふれる。

### A.1 3角法

各辺が  $a, b, c$  で、それらに対する頂角が  $A, B, C$  である平面3角形を考える(図 A-1a)。外接円の直径は、各辺の長さをそれらに対する頂角の正弦によって割ったものに等しい。これが3辺すべてについて正しいので、

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$