環状走査形距離検出による 3-D 物体の特徴抽出[†]

——環状距離入力とその多面体への応用——

木下 源一郎*・山口 卓**・出澤 正徳***

Feature Extraction of 3-D Object by Circular Range Sensing

—Circular Range Acquisition and It's Application to Polyhedra—

Gen-ichiro KINOSHITA*, Takashi YAMAGUCHI** and Masanori IDESAWA***

A method of feature extraction for 3-D objective surface by circular range acquisition is proposed and investigated. In the experimental system, circular range acquisition is realized by moving an optical range sensor mechanically along a circular path.

A prototype of an optical range sensor, which adopting a 2.0 mW He-Ne gas laser as a light source, 342 mm (length) × 130 mm (width) × 174 mm (height) body size and 5 kg weight was manufactured. This range sensor is mounted on the wrist of a SCARA robot (A 3020, Hitachi).

The range sensor is positioned sequentially at a point along the circular path with a given radius around the axis passing through the target point and detects the range to the corresponded point on the surface of an object.

The surface feature around the target point is identified by investigating the variation of the acquired range data along the circular path. Applying the above operation to the surface of an object to be tested, surface features of an object can be extracted. Surface features, such as planes, vertices and edges, are represented as a polar coordinates representation of the range variation along

the circular path. Thus, the circular range acquisition and the feature extraction of the surface are applied to the different types of vertices on a polyhedra.

Moreover, the circular range acquisitions tracing on the edge line are carried out over the surface of an object and experimental results are reported.

Key Words: circular range acquisition, feature extraction, range sensor, surface feature, circular path

1. 序 論

今日、ロボットによる組立作業、調整作業などの自動化が進められているが、さらにその自律的なロボット作業の実現が待たれている。このロボット作業の自律化を実現するためには、ロボットのセンシング機能のよりいっそうの高度化が必要である。特にロボットは多くの3次元的な形状をもった部品、あるいは物体を対象とするので、この形状と特徴についての識別、ならびにその位置、姿勢などについて、その情報取得が各作業段階の目的に応じて必要となる。

このように、作業対象となる物体の形状識別ならびに特徴抽出は、一般にカメラを使って受像される画像、あるいは距離画像によって行われている^{1), 2)}。また、これらの処理の効率化のために、既知の光学的パターンを物体表面上に投影し、その像を受像してパターンの変形から物体表面の特徴を抽出する方法なども開発されている³⁾。

一般に、物体の識別に画像処理を利用する方法は、ロボットの作業領域の情報を一括して取得する場合に有効である。しかしながら、ロボット作業の場合、対象物を作業に応じて設定された方向から、その対象物の表面までの距離、形状といった局所的な情報の取得

[†] 第26回計測自動制御学会学術講演会で発表
(昭62・7)

* 中央大学理工学部 文京区春日 1-13-27

** 富士写真フイルム(株) 神奈川県足柄上郡開成町宮合 798

*** 理化学研究所 和光市広沢 2-1

* Faculty of Science and Engineering, Chuo University, Bunkyo-ku, Tokyo

** Fuji Photo Film Co., Ashigarakami-gun, Kanagawa

*** The Institute of Physical and Chemical Research, Wakoh

(Received June 23, 1988)

(Revised September 7, 1988)

が特に必要とされ、このためのセンサならびに処理システムが求められている。

そこで、本研究ではこの対象となる物体表面上の局所的領域に対する情報取得として距離情報に注目を行い、物体表面上の注目点に対して、その点までの距離情報の取得と、その注目点回りの環状走査に応じて得られる距離情報から表面形状の特徴を取得する光学的な方法について提案する。また、本方法の有効性について、筆者らが開発した距離センサ^{5),6)}とロボットを利用して、その基本的な実験を行った。本報告では、本方式の提案とその基本的な機能の実験結果と多面体への応用について述べたものである。

2. 距離センサの環状走査法の原理

2.1 距離センサの環状走査

ロボットハンドの作業に応じて、対象物表面の局所的な領域の情報取得が必要である。この基本的な情報は距離情報であり、物体表面の注目点までの距離とその周囲の距離変化から得られる形状である。

そこで、物体表面に対する距離情報は、注目点までの距離の取得とその点を中心として環状に走査を行うと同時に距離を検出して、注目点からの距離変化として取得する。筆者らは、この方法を環状走査法と呼んでいる。

この方法の特徴は、対象となる物体表面の注目点回りに走査が環状に閉じている点であり、円環状に閉じることによって、つぎのような特徴を有する。(1)対象となる物体表面に対して、環状に走査を閉じることによって、その表面領域が閉じられて、その領域が特定され、(2)表面の特徴がその方向性に影響されずに、等方的な検出特性で抽出されるという重要な特徴を有する。また、(3)環状走査に対応する距離変化から、平面、エッジなどの特徴の判別が容易になり、(4)環状走査における2個の特徴点から、特徴の方向などを推定でき、エッジなどの特徴に沿った探索が容易になる。しかし、本方法は、物体表面のそれぞれの注目点に対して順次行ってゆく必要がある。

つぎに、距離センサの環状走査を行い、その距離情報より特徴パターンを取得する方法について述べる。

距離センサの環状走査に対して、その座標系を Fig. 1 のようにとる。距離センサの位置ベクトル $\mathbf{p}$ において、センサのアプローチ・ベクトルを $\mathbf{a}$ 、方向ベクトルを $\mathbf{o}$ 、法線ベクトルを $\mathbf{k}$ とする。ここで、センサの位置ベクトル $\mathbf{p}$ から物体表面上の注目点として、位置ベクトル $\mathbf{q}$ までの距離 d は、 $d = \mathbf{q} - \mathbf{p}$ である。つぎに、距離センサを位置ベクトル $\mathbf{p}$ の位置を中心に、ベ

Fig. 1 Conceptual figure of the circular scanning range sensing system with an optical range sensor and robot

クトル $\mathbf{o}$ および $\mathbf{k}$ を含む面 ($\mathbf{o}-\mathbf{k}$ 平面) において半径 $|\mathbf{r}|$ の円弧を描き、環状に走査を行って対応する物体表面上の距離を位置ベクトル $\mathbf{q}$ からの距離変化量 $\Delta \mathbf{q}$ として求める。

ベクトル $\mathbf{p}$ の位置から環状走査の円弧上の点までのベクトルを $\mathbf{r}$ として、これが物体表面上に正射影されたベクトルを $\mathbf{s}$ とする。また、注目点における物体表面の法線ベクトルを $\mathbf{N}$ とすると次式が成立する。

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} = 0, \quad \mathbf{s} \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (1)$$

つぎに、ベクトル $\mathbf{r}$ と $\mathbf{s}$ との関係は、 t を定数として、

$$\mathbf{s} = \mathbf{r} + t\mathbf{a} \quad (2)$$

と書くことができる。(1), (2)式より、

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{q} &= \mathbf{s} - \mathbf{r} \\ &= -\frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{a}} \mathbf{a} \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。

いま、距離センサの環状走査の実現を計るために、スカラー型のロボットを使って、その基本的な実験を行うと仮定すると、上述のアプローチ・ベクトル $\mathbf{a}$ は、 $\mathbf{a} = (0, 0, -1)$ で与えられる。

そして、ベクトル $\mathbf{r}$ は、大きさ $|\mathbf{r}| = r$ 、 $\mathbf{o}$ 軸より角度 ϕ であるとする。

ここで、例として、物体表面が (i) 斜面の場合、(ii) エッジの場合、(iii) アプローチ・ベクトルに垂直な平面の場合について距離変化量 $\Delta \mathbf{q}$ を求める。

Fig. 2 Typical patterns of polar coordinates plot of range variations for a plane surface and edge obtained by the circular range sensing
 —: $\Delta q_z > 0$, ----: $\Delta q_z < 0$

(i) 斜面: 物体表面が y 軸回りに θ 度回転している場合

この場合, Fig. 2(a) のように座標系をとると

$$\mathbf{N} = (\sin\theta, 0, \cos\theta) \quad (4)$$

$$\mathbf{r} = (r\cos\phi, r\sin\phi, 0) \quad (5)$$

となるので, 距離変化量 Δq は, 次式で与えられる.

$$\Delta q_z = -r \tan\theta \cos\phi \quad (6)$$

ただし, Δq_z は Δq の z 成分である.

(ii) エッジの場合: $x \geq 0$ に対して, y 軸回りに θ 度回転し, $x < 0$ に対して $-\theta$ 度回転した場合で Fig. 2(b) のように座標系をとると (i) と同様に $x \geq 0$ に対して, すなわち, $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ で,

$$\Delta q_z = -r \tan\theta \cos\phi \quad (7)$$

つぎに, $x < 0$ に対して, すなわち, $\pi/2 \leq \phi \leq 3\pi/2$ で,

$$\Delta q_z = r \tan\theta \cos\phi \quad (8)$$

となる.

(iii) 平面: アプローチ・ベクトルに垂直な平面の場合 (Fig. 2(c)):

(6) 式において, $\theta = 0$ であるので, 次式となる.

$$\Delta q_z = 0 \quad (9)$$

つぎに, 環状走査によって注目点からの距離変化量 Δq_z をベクトルの大きさ, 環状走査における角度 ϕ をその偏角として, $u-v$ 平面に極座標表示する. この

とき, 物体表面の特徴と $u-v$ 平面の特徴が対応できるように, x 軸と u 軸の方向を一致させるために, 次式によって表示する.

$$u = -\Delta q_z \cos\phi \quad (10a)$$

$$v = -\Delta q_z \sin\phi \quad (10b)$$

このように Δq_z の値を極座標表示すると物体表面の注目点回りの特徴に応じたパターンが得られ, これを特徴パターンと呼ぶことにする.

そこで, 上述の (i), (ii), そして (iii) の場合について (10a) (10b) 式に応じて特徴パターンを描くと, Fig. 2(d), (e), (f) が得られる. また, この図において, 点線は $\Delta q_z < 0$ の場合で, 物体表面がセンサから見て, 注目点より遠方にある場合であり, 実線は, $\Delta q_z > 0$ の場合で手前にある場合について示している.

2.2 距離センサの環状走査によるエッジ検出

特徴パターンからエッジの凹凸ならびに方向の検出において, 環状走査の直径に相当する範囲内でエッジが直線的と仮定する. このとき, 物体表面の特徴表示には, 2.1 節に示した特徴パターンの 2 次元的な極座標表示として考えたほうがわかりやすいが, エッジ情報の抽出には, 距離変化量 Δq を環状走査の回転角度 ϕ について展開した 1 次元的な形として処理する方法が効率的である. すなわち,

$$f(\phi) = \Delta q \quad (11)$$

として、 $f(\phi)$ を考える。

つぎに、物体表面上の注目点、ベクトル $\mathbf{q}$ において、ベクトル $\mathbf{o}$ 、 $\mathbf{k}$ を含む平面に平行な $\mathbf{o}-\mathbf{k}$ 平面において、この原点を中心とした半径 r の環状走査において、注目点からの距離変化量 $f(\phi)$ を求め、つぎのようにエッジを検出する。

エッジ P_1 、 P_2 を、Fig. 3 に示すように仮定すると、環状走査において、 $\mathbf{o}$ 軸より ϕ_1 、そして ϕ_2 の角度において、距離変化の勾配の符号が変わる。したがって、エッジ検出は、 $f(\phi)$ に対して、 $df(\phi)/d\phi=0$ として極値を求め、そのときの角度 ϕ において、その変化状態を調べ凹凸の判定を行って、エッジの位置、方向が検出される。

すなわち、環状走査において、回転角度 ϕ を n 等分 ($\Delta\phi=360/n$) し、そのおのおのの角度を ϕ_i ($i=1\sim n$, $\phi_0=\phi_n=0^\circ$) とする。そして、回転角度 ϕ_i におけるセンサ出力を $f(\phi_i)$ とする。ここで、エッジの検出は、上述のようにセンサから得られた距離変化量 $f(\phi_i)$ が、回転角度 ϕ_i の前後の変化を検出することで、つぎの式

$$\{f(\phi_i)-f(\phi_{i-1})\} \times \{f(\phi_{i+1})-f(\phi_i)\} < 0 \quad (12)$$

$$|2f(\phi_i)-f(\phi_{i-1})-f(\phi_{i+1})| > T \quad (13)$$

が成立する回転角度 ϕ_i を求める。

(a) Circular range scanning and edge

(b) Remarkable changes of output signal for the variation of range

Fig. 3 Conceptual figure showing the edge finding scheme

ただし、 T は、エッジ判定のためのしきい値である。つぎに、検出された回転角度 ϕ_i からエッジの位置を $\mathbf{o}-\mathbf{k}$ 平面において (o_1, k_1) 、 (o_2, k_2) として求める。

3. 距離センサの環状走査システム

3.1 距離センサの構成⁵⁾

本研究で用いている距離センサは、環状光投射形センサで、つぎに示す特徴を有する。

(i) 物体表面までの検出距離は、264 mm から 364 mm の範囲でほぼ 0.1 mm の繰返し精度を有する。

(ii) 本センサは、投影レンズ移動形であるが、

Fig. 4 Block diagram of the circular scanning range sensing system

Photo. 1 Circular scanning system of an optical range sensor by a SCARA robot

Fig. 5 Examples of the polar coordinates plot pattern of the range variation
 $\times$: $\Delta q \geq 0$, $\bullet$: $\Delta q < 0$

設定位置にレンズを固定した場合、その基準となる距離を中心に ± 1 mm の範囲にわたって、距離変化を線形に検出することが可能である。

本研究では、距離センサが有するこの二つの特徴を利用して距離検出と距離変化量を抽出している。はじめに、検出すべき物体表面上に注目点を定め、その注目点までの距離を検出する。つぎに、(ii)の性質を用いるために、投影レンズを設定量だけ移動させて固定し、距離変化量を検出する。この注目点を中心に設定された半径でセンサを環状に走査すると、注目点における距離を基準とした距離変化量が得られる。

3.2 距離センサの環状走査

システムの構成

本研究では、スカラー形ロボットハンドに上述の距離センサを搭載して、Fig. 4 に示すようなブロック図の環状走査システムを実現した。このようすを Photo. 1 に示す。

距離センサの環状走査は、ロボットハンドの位置・姿勢制御によって、注目点を中心に設定された半径で 10° ずつ位置決めできるように、あらかじめティーチングを行って実現した。この方式は、任意の半径を容易に設定することが可能であるが、動作速度はロボットの性能に依存する。

4. 物体表面の特徴パターン取得

4.1 平面、エッジの場合の特徴パターン検出

距離センサの環状走査システムによって、2.1 節に示した(i)~(iii)の例に対して、特徴パターンは、つ

Fig. 6 Experimental results for tracing on the edge surface with the circular scanning

ぎのように得られた。

(i), (ii)の場合は、Fig. 2(a), (b)において $\theta = 45^\circ$ とし、(iii)の場合には、 $\theta = 0^\circ$ としてその実験結果を Fig. 5 に示す。対象がエッジの場合において結果が左右対称でないのは、対象となる物体表面の傾斜、センサ自身の特性の不揃いの影響がでていると思われる。

つぎに、距離センサの環状走査の対象が(ii)のエッジの場合、エッジ方向と垂直に注目点を移動し、それぞれの注目点において環状走査を行って得られた特徴パターンを Fig. 6 に示す。この結果より、物体表面のエッジ、それぞれの注目点位置の特徴パターンの変化からエッジ存在の予測が可能であることがわかる。

つぎに、2.2 節に述べたエッジの方向検出について

実験を行った。エッジが $x \geq 0$ に対して、 $\theta = 0^\circ$ 、 $x < 0$ に対して、 $\theta = -90^\circ$ である物体（表面：白紙）を対象とした。Fig. 7 の図中に示すように、エッジを注目点回りに一定角度ずつ回転して、環状走査を行い、

Fig. 7 Experimental results for finding the direction of edge

エッジの方向検出を行って得られた結果が、Fig. 7 である。

4.2 多面体の頂点に対する特徴パターンの取得

3次元的な物体の画像処理による識別は、画像内で表現されている線分、接点を物体のエッジ、頂点に対応づけることであり、線面の解釈と呼ばれている。そこで、本研究では、対象となる物体を多面体と仮定して、いわゆる三面世界における頂点辞書⁴⁾に注目を行い、それぞれの頂点に対して、距離センサの環状走査を行って、その距離変化量を検出し、頂点の特徴パターンを取得した。

頂点の形状には、基本的に凸形と凹形があり、それぞれが画像内の線面として出現する場合、Y接点、W接点、およびV接点として表現され、それらが出現する形は合計12個の形に分類⁴⁾される。頂点回りの環状走査を行うという観点から、頂点の形の対称性、相似性などを考慮して、これは、8種類に分類され、Fig. 8 のようになる。

そこで、多面体の頂点として考えられる8種類の形状について、Fig. 8 に示すようにそれぞれの頂点に

Fig. 8 Typical types of vertices and polar coordinates plots pattern of the range variation obtained by the experimental system

対し、ほぼ紙面と直角方向にアプローチ・ベクトルを定めて環状走査を行い、その結果得られた特徴パターンを Fig. 8 に示す。実験では頂点の先端にアプローチ・ベクトルを合せることは困難であるので、その近傍に設定して行った。また、環状走査によるこの方法は、アプローチ・ベクトルの方向によって、その特徴パターンが変化するが、Fig. 2(c)に示すように平面の法線ベクトルとアプローチ・ベクトルが、平行になるときセンサから得られる特徴パターンは 1 点になり、ある角度で交わるときは円弧になる。したがって、これは、ハンドを物体表面への法線ベクトル方向に姿勢を制御する場合に応用できる。また、Fig. 8 (a) のように、凸形の頂点の場合、特徴パターンは、三つ葉のような三方向に円弧のパターンとなる。

5. 物体表面のエッジ検出とエッジ探索

多面体は、頂点、エッジそして平面からなるので、それぞれを識別し、その相互の関連性を求めることにより多面体の識別が行われる。そこで、この環状走査は、2.2 節に示すようにエッジ検出とその方向検出が可能であるので、これをエッジの探索に応用する。

5.1 物体表面のエッジ検出

多面体のエッジ検出ならびに頂点の検出は、つぎのように各探索点において、環状走査とその処理によって行われる。

(i) エッジ検出

物体表面のエッジ検出は、2.2 節に示したように行われる。物体表面上の注目点までの距離が検出され、環状走査によってその注目点の距離を基準にした距離変化量 $f(\phi)$ が求められ、エッジとその方向が求められる。

(ii) エッジ検出不能の場合

エッジが検出されず、距離変化量がないとき、その注目点付近は平面と識別される。しかし、エッジの探索が仮定されている場合には、その付近にエッジが存在する可能性が高いので、Fig. 9(a) のように、環状走査を同じ注目点の位置でその半径を変化させて行い、再度エッジ検出を行う。

(iii) 頂点検出の場合

1 回の環状走査で頂点を検出するには、Fig. 8 に示す結果を参照して識別する必要がある。しかし、エッジ探索の場合、それまでに検出されたエッジの方向がわかっているので、その方向と異なるエッジが検出された場合、そこを頂点と考えることができる。このとき環状走査を同一の注目点位置において、(ii) に示すように環状走査の半径を大きくして行い、2 回の環

Fig. 9 Conceptual figure showing edge finding operation

●: edge position, ○: target position of circular scanning

状走査の結果から、エッジ候補の方向が互いに異なるとき頂点として識別する (Fig. 9(b)).

5.2 エッジ探索

エッジ探索は、物体表面上の注目点をエッジに沿って、上述の (i) ~ (iii) に示すエッジ、頂点の検出を行って移動し、物体表面全体のエッジを捜すことである。

この探索例は、Fig. 9(c) に示すように、注目点 (i) の位置において環状走査を行い、エッジの位置ならびにその方向を求め、このエッジ方向の延長線上において、一定距離離れたつぎの注目点の候補を求める。つぎに、その注目点において環状走査を行う。このとき、(ii) のようにエッジが見つからないとき、再度環状走査の半径を大きくして実行し、エッジを見つける。そのエッジの位置、方向からつぎの環状走査を行う注目点の候補 (iii) を求める。また、(iv) は頂点の検出の例である。

5.3 エッジ探索の実験結果

はじめに、距離センサによる距離画像を求めるために、作業領域にわたって距離を求める。立方体 (15 mm × 15 mm × 15 mm) の表面に白紙を張り、頂点の一つを作業面に固定し、これを対象物体として実験を行った (Photo. 2)。実験の対象領域は、100 mm × 100 mm で、環状走査の半径は 2 mm とした。この立方体に対し、2.5 mm 間隔で 1,600 点に対して距離検出した結果について表示したものを Fig. 10(a) に示す。

つぎに、本環状走査法によるエッジ探索についての実験はつぎのように行った。はじめに、物体表面の周囲のエッジに沿ってエッジ探索を行い、頂点の検出と物体表面内部へのエッジ候補を調べ、つぎにそのエッ

Photo. 2 A photograph of the object used for the experiment

(a)

(b)

(c)

Fig. 10 An example of the experimental results for edge tracing operation on a cube

ジについて探索を行い、そのときのエッジ探索に沿って注目点の位置を接続して表現したものを Fig. 10 (b)に示す。またおのおのの注目点位置において、環状走査を行い、検出されたエッジの位置と、そのおのおののエッジに分けて直線補間を行った結果について表示したものを Fig. 10(c)に示す。

このとき、各頂点は、直線補間によって得られた直線の交点から求めているが、3本の直線の交点として求めるのは難しく、2本の直線との交点近くの距離データを使って決定している。

本実験結果より、エッジを探索して、エッジの位置

とその方向、ならびに頂点の識別と座標の検出が可能で、多面体のエッジ探索によって、その表面の情報が検出できることがわかる。

6. 結 論

本研究では、物体表面の各位置において、環状に距離情報を取得し、物体表面の面、エッジ、頂点などの特徴抽出法を提案し、ロボットを使って距離センサを環状に走査することにより環状距離入力を実現し、原理確認のための基本的な実験結果について示した。

つぎに、多面体の頂点辞書に上げられる各頂点に対して、距離センサによる環状走査を行い、その特徴パターンを実験的に求めた。また、いくつかの物体に対して、エッジ探索を行い、エッジの位置とその方向、ならびに頂点の識別が可能であることを示した。本実験によって、物体表面の特徴抽出に環状に距離情報を取得する方法が有効であることを示した。

今後、環状に距離情報を取得するための実用的なセンサ、特にその高速化について、また曲面への応用、さらに、物体についての構造の知識などを利用して、3D 物体理解システムの構築を目指す予定である。

参 考 文 献

- 1) M. Oshima and Y. Shirai: A Scene Description Method Using Three-Dimensional Information, *Pattern Recognition*, **11**, 9/17 (1979)
- 2) 青木, ほか: パターン投影法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測, *電子通信学会論文誌*, **J68-D-3**, 384/391 (1985)
- 3) 吉武, 杉江, 杉原: 規則的なパターンの投影像を利用した三次元物体の識別の試み, *コンピュータビジョン*, **42-2**, 1/8 (1986)
- 4) D. A. Huffman: Impossible Objects As Nonsense Sentences, *Machine Intelligence*, **6**, 295/324, Edinburgh Univ. Press (1979)
- 5) 木下, 出澤: ロボット用光学的距離センサの開発, *計測自動制御学会論文集*, **22-11**, 1204/1209 (1986)
- 6) 木下, 山口, 出澤: 距離センサの環状走査による3D物体の特徴抽出, 第26回 SICE 学術講演会予稿集, JS 28-4 (1987)
- 7) 木下, 山口, 出澤: 距離センサの環状走査による3D物体の特徴抽出 (第2報), 第26回 SICE 学術講演会予稿集, JS 28-5 (1987)
- 8) 木下, 出澤: 環状光投射形ロボット用近接覚センサ—距離情報と表面傾斜状態の取得—, *電気学会論文集 C*, **107-5**, 436/442 (1987)