画像認識とベジエ曲線を利用した未知形状認識と グラインディングロボットへの応用

Recognition of Unknown Surface Shape used Image Recognition and Bezier Curve for Grinding Robot System

○ 佐藤篤 (岡山大)
 足立賢 (岡山大)
 正 見浪護 (岡山大)
 正 矢納陽 (岡山大)

Atsushi SATO, Okayama University Ken ADACHI, Okayama University Mamoru MINAMI, Okayama University Akira YANOU, Okayama University

Recently industrial robots are used for many purposes, especially as machining facilities. Many of grinding robots are controlled by using feedback of force. However, the force sensor used for force detection by means of strain gage will be damaged if a shock and big force should be applied. So, this laboratory has been researching with a method for grinding a target object into desired shape with force-sensorless feed-forward control. The dust made by grinding injures respiratory organs or eyes of worker. Therefore, this research aims to achieve construction of the robot system which can perform autonomously grinding. It is necessary to measure the unknown surface to decontaminate. This paper proposes a new recognition method to detect arbitrary shape using Bezier Curve and shows the result of grinding experiment using the method.

Key Words: Grinding, Bezier Curve, Image recognition

1 緒言

現在, 製造業におけるロボットの用途は多種多様になっており, 工作機械に多く利用されている.研削作業を行うグラインディン グロボットでは、カセンサを用いてフィードバック制御を行うも のが多く見られる.しかし、力検出に用いる力センサは、歪み ゲージによって力を計測しているため大きな力や衝撃が加わると 破損してしまうおそれがある. そこで, 我々は力センサを用いず にフィードフォワード制御によって,目標形状の研削が行える手 法[1]を用いている.研削作業に伴って発生する粉じんは、作業 者の呼吸器や眼などへ悪影響を及ぼすことから、本研究では研削 作業の自動化を目指している.これまでの研究において,研削対 象物の表面形状はあらかじめ与えられてた. 自律的に研削作業を 行うために,研削対象物の未知表面形状を認識し,それを研削制 御に利用する必要がある. そこで, カメラを用いた認識技術 [2] を応用して表面形状を認識し、認識結果に基づいて任意形状対象 物の表面研削を行う.本報では、カメラ画像から表面形状を認識 し、ベジエ曲線 [3][4] を用いて形状のモデリングを行う認識手法 について述べる.また2次元対象物の表面形状を認識し、この提 案手法を用いた表面研削制御を行った結果を示す.

2 グラインディングロボットの概要

図1に実験装置であるグラインディングロボットを示す.この ロボットは平面2リンクマニピュレータであり、今回認識を行う 対象は2次元で考え、1台のカメラを使用する.

2.1 拘束運動のモデリング

拘束運動のモデルを図2に示す.拘束条件Cを考慮したリンクの位置/姿勢を表す運動学方程式を式(1)に示す.

$$C(\boldsymbol{r}(\boldsymbol{q})) = 0 \tag{1}$$

ここで,**r**は拘束を受けるリンクの位置ベクトル,**q**はリンクの 角度を表す.

拘束力が作用するモデルの運動方程式は式(2)のように表さ



Fig.1 Experimental device



Fig.2 Grinding robot model

れる.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{J}_{C}{}^{T}\boldsymbol{f}_{n} - \boldsymbol{J}_{R}{}^{T}\boldsymbol{f}_{t} \quad (2)$$

$$oldsymbol{J}_{C}{}^{T}=rac{\left(rac{\partial C}{\partialoldsymbol{q}}
ight)^{T}}{\left\|rac{\partial C}{\partialoldsymbol{r}}
ight\|}, \quad oldsymbol{J}_{R}{}^{T}=\left(rac{\partialoldsymbol{r}}{\partialoldsymbol{q}}
ight)^{T}rac{\dot{oldsymbol{r}}}{\left\|\dot{oldsymbol{r}}
ight\|}$$

ここで, *M* は実機が2リンクマニピュレータであるので2×2 の慣性行列, *h* はコリオリ力・遠心力, *D* は粘性摩擦係数, *g* は 重力の影響を表すベクトルであり、 τ はリンクの駆動トルク、 f_n は拘束力、 f_t は摩擦力を表す.また、 J_C^T 、 J_R^T はそれぞれ拘 束力 f_n 、摩擦力 f_t の係数を表す.

また,図2で表されるグラインディングロボットは拘束面に接触 しつつ運動をしなければならない.これは,式(2)の運動方程式 が,式(1)で表される拘束条件を満たしていなければならないと いうことである.

式 (1),(2) から拘束力 f_n は,

$$f_n = a(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \boldsymbol{J}_R^{-1} f_t - \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \boldsymbol{\tau}$$
(3)

となる.ここで,

$$a(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \stackrel{\Delta}{=} m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}} \right\| \left\{ -\dot{\boldsymbol{q}}^T \left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \dot{\boldsymbol{q}} \right] + \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \boldsymbol{M}^{-1} (\boldsymbol{h} + \boldsymbol{g}) \right\}$$
(4)

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \stackrel{\Delta}{=} m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}} \right\| \left\{ \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \boldsymbol{M}^{-1} \right\}$$
(5)

$$m_c \stackrel{\triangle}{=} \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right) \boldsymbol{M}^{-1} \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T \tag{6}$$

とおく. $a(q, \dot{q})$ はスカラー, τ を含まない項の和, B(q)は τ の 係数ベクトルである.上式より拘束力 f_n は $q, \tau \ge f_t$ に従属し て定まることがわかる.

2.2 位置・力同時制御

前節のハンド拘束運動のモデリングの中で得られた式 (3) は f_n が q, \dot{q} , f_t の代数関数として与えられることを示しており, これは q, \dot{q} , f_t を観測することができ,理想的には f_n を実現 できる入力 τ を決定できることを意味している.

式 (3) より、拘束力 f_n の目標値 f_{nd} を実現する τ は、

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{B}^{+}(\boldsymbol{q})\{f_{nd} - a(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_{R}^{T}f_{t}\} + \{\boldsymbol{I} - \boldsymbol{B}^{+}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\}\boldsymbol{k}$$
(7)

と求めることができる. $B^+(q)$ は B(q)の擬似逆行列である. 上 式において右辺第一項は時刻に拘わらず目標拘束力 f_{nd} を実現す るトルク τ のノルム最小値を与える. また第二項は f_{nd} の実現 には無関係にマニピュレータの位置制御入力を与えられる. 従っ て上式は f_{nd} を実現する入力 τ が qの関数としてノルム最小の 最適解を与えている.

ここで任意ベクトル k をハンドの位置制御用の入力として用 いることとし、作業座標系で表されたハンドの位置偏差、速度偏 差を用いて、

$$\boldsymbol{k} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T \left\{ \boldsymbol{K}_P(\boldsymbol{r}_d - \boldsymbol{r}) + \boldsymbol{K}_D(\dot{\boldsymbol{r}}_d - \dot{\boldsymbol{r}}) \right\}$$
(8)

と決定する. K_P は比例ゲイン行列であり, K_D は微分ゲイン 行列である. また r_d は拘束条件を満足するハンドの目標軌道で ある. 式 (8) の k がいかなる値のときも式 (7) で算出される τ を 式 (3) に代入することで $f_n = f_{nd}$ となる.

3 対象物の認識

認識は、Model-based Matching 法と遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて行う. Model-based Matching 法とは、認識対象の色と 形状がわかっているときそれと同じ探索モデルを画像上に投影し て、画像と一致しているかを評価することで画像認識を行う手法 である. 位置と姿勢をさまざまに変更し、画像と一致する探索モ デルを得ることで対象物の位置と姿勢を知ることができる. この 探索を GA によって行うことで全探索を行うよりも少ない処理 で認識ができる.

本研究で認識するのは研削対象物の表面形状である.今回の実 験では、対象物を白、その背景を黒とした環境で行い対象物と背 景の境界を認識することで表面形状を認識する.



Fig.3 Searching model



Fig.4 How to search surface



Fig.5 Points of recognition

Object(White)



Fig.6 Modeling by Bezier Curve



Fig.7 The flowchart of searching surface

探索モデルを、図3のように楕円形モデルとして用意する.探 索モデルは、探索点の集まりである.前述のように探索モデルは 色と形状の情報を持っている.探索点の配置の仕方が形状の情報 であり、色の情報は探索点それぞれが持っている.図3の左のよ うな形に点を配置し、黒の色情報を持った領域を S_b 、白の色情 報を持った領域を S_w とする.これを簡略化して右のようにモデ ルを描くとする.この探索モデルは、中心位置と姿勢 θ によって 表される.モデルがカメラ画像上に投影されたとき、探索点があ らかじめ持っている色と画像上の色が一致しているか判定が行わ れる.この判定結果から、画像とモデルがどの程度一致している かを評価する関数が次項の式(9)に示す適合度関数である.

3.1 適合度関数

 $r_{i,j}$ は、カメラ座標系 Σ_C で表したある探索点の色であり、 $p(r_{i,j})$ はある探索点の色 $r_{i,j}$ と画像上の色が一致しているとき 1、そうでないとき -1となる関数である。適合度関数を探索モ デルの位置と姿勢を変数とした $F(\phi)$ とすると、

$$F(\boldsymbol{\phi}) = \sum_{\boldsymbol{r}_{i,j} \in S_b} p(\boldsymbol{r}_{i,j}) + \sum_{\boldsymbol{r}_{i,j} \in S_w} p(\boldsymbol{r}_{i,j})$$
(9)

となる.

3.2 探索手法

楕円形探索モデルによって対象物と背景の境界を認識する.探 索手法を図7に示す.図4に示すように楕円形モデルを数珠つな ぎに伸ばしていくことで、境界線を連続した点の集まりとして認 識できる.

一つ目の楕円形を1次楕円形,次を2次楕円形と呼ぶ.1次 楕円形は位置と姿勢が未知であり,これらを探索する.2次以降 では一つ前の楕円形から位置は決定されるので,姿勢のみを探索 する.

適合度関数を用いることで、位置と姿勢の探索する問題は適合 度関数を最大化する問題に置き換えることができる.適合度最大 化問題に対して GA を適用することで探索時間の短縮を行う.

3.3 3次ベジエ曲線による表面形状のモデル化

対象物の表面に沿った点群から曲線にモデル化を行う. このとき 3 次ベジエ曲線を用いる. 図 6 のように対象物は複数の 3 次 ベジエ曲線で表され,式(10)のようにかける. ただし u は媒介 変数で範囲は $0 \le u \le 1$ である.式(10)で $0 \le u \le 1$ の範囲で u が変化するときその軌跡は曲線を表す.

$$\boldsymbol{B}_{i}(u) = \begin{bmatrix} (1-u)^{3} \\ 3u(1-u)^{2} \\ 3u^{2}(1-u) \\ u^{3} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{3i} \\ \boldsymbol{q}_{3i+1} \\ \boldsymbol{q}_{3i+2} \\ \boldsymbol{q}_{3i+3} \end{bmatrix}$$
(10)

4 研削実験

ここでは、実際に研削実験を行った結果を示す.研削対象物と して図8に示すものを用いる.この研削対象物を実験環境に設置 し、図8に示す矢印の部分を矢印の方向に研削を行う.位置/力 同時制御を行った結果としてハンド手先軌道および、手先拘束力 を示す.

4.1 認識

実験環境に設置を行い,カメラから対象物を映したものを図9 に示す.白い部分が研削対象物で,黒い部分が背景である.

画像認識した結果を図 10 に示す.また,その一部を拡大した ものを図 11 に示す.図 11 より,研削対象物と背景との境を認識 できていることがわかる.

認識結果から得られた点をベジエ曲線を用いて関数化した結果 を図??に示す.マーカーで示すプロット点が画像認識からの結果 で,実線で示すものがベジエ曲線によって関数近似したものであ る.この結果を用いて研削実験を行った.

4.2 研削

実際に研削対象物をグラインディングしているときの様子を図 12 に示す. 各リンクのエンコーダから得られた手先位置と目標 値として与えたベジエ曲線とを比較したものを図 13 に示す. ま た,手先位置と目標手先位置との偏差をそれぞれ図 15,図 16 に 示す. さらに,目標拘束力と拘束力の結果を図 14 に示す.

以上の結果より、画像認識から推定した研削対象物の形状を研 削することができた.図13,15,16より、画像認識から推定し た形状と実際にグラインディングロボットが研削対象物と接触し ていた手先位置から得られた形状との差が6~8[mm] 程度あるこ とがわかる.目標位置として与えていた推定値が実際の形状より 奥にあるため、目標位置に制御する前に対象物と接触している. そのため、力制御がコントローラで設定していた目標拘束力より 多く加えることとなり、図14からもわかるように、拘束力が目 標の値より大きくなっていると考えられる.推定形状と実際の形 状に差が生じた要因として、認識の精度が挙げられる.図10よ り、楕円形モデルが研削対象物と背景との境より対象物側に入り 込んで認識しているように見える.また、カメラの取り付け位置 や水平垂直に取り付けられていないことで、正確に各座標系を計 測できていないなどの要因が考えられる.

5 結言

研削の自動化をめざし、カメラ画像による2次元対象物の未知 表面形状認識を行い、研削実験を行った.今回の実験から、画像 認識から推定した研削対象物の形状に対して、手先拘束力を一定 値に制御しながら研削することができることを示した.



Fig.8 Object to grind





Fig.9 Image of object using camera

Fig.10 Search result



Fig.11 A part of Search result



Fig.12 Capture of grinding

References

- Ken Adachi, Mamoru Minami, Akira Yanou:"Improvement of Dynamic Characteristics during Transient Response of Forcesensorless Grinding Robot by Force/Position Control" IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp.710-715, August 4-7,2013.
- [2] 西村健太,須浪唯介,矢納陽,松野隆幸,山下学,石山新太郎,見 浪護:"多機能センシング環境対応制御(MOS制御)による嵌合精 度検証試験"第57回自動制御連合講演会,2014.
- [3] 山口富士夫,"コンピュータディスプレイによる形状処理工学[2]", 日刊工業新聞社, pp1-67,1982.
- [4] 山口富士夫,"コンピュータディスプレイによる形状処理工学[1]", 日刊工業新聞社, pp38-53,1982.





 ${\bf Fig. 14} \ {\rm Result} \ {\rm of} \ {\rm constrained} \ {\rm force}$



