

ベジエ曲面を用いた任意研削対象物の形状推定

Shape Estimation by Bezier Curve for Arbitrary Grinding Objects

○ 山本一真 (岡山大) 佐藤篤 (岡山大) 和泉卓朗 (岡山大)
正 見浪護 (岡山大) 正 松野隆幸 (岡山大)

Kazuma YAMAMOTO, Okayama University, pv101x75@s.okayama-u.ac.jp
Atsushi SATO, Okayama University
Takuro IZUMI, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University
Takayuki MATSUNO, Okayama University

Industrial robots are used for many purposes, especially as machine facilities. For example, there are many tasks such as welding, assembling and grinding operations. Grinding robots are generally controlled by feedback control with force sensors. However, the force sensor used for force detection by means of strain gage could be easily damaged when an impact is added. Therefore, our laboratory has been researching a method for grinding an arbitrary-shaped target object into desired shape by force-sensorless feed-forward and feed-back control. This research aims to achieve construction of the robot system that can perform autonomously decontamination grinding of radioactive contamination machine parts to work on decommissioning of the Fukushima No.1 nuclear power plant. It is necessary to measure the unknown surface to decontaminate by our force-sensorless grinding control method. In this thesis, in order to estimate the surface of arbitrary objects, our grinding robot traces object's surface. After that, we get points from the hand trajectory of the grinding robot and estimate the surface shape using the Bezier surface. Finally, I show results of grinding experiments with the estimation surface shape data.

Key Words: Grinding, Shape estimation, Grinding operation

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。例えば、溶接作業、組立作業、研削作業 [1],[2],[3] などがある。多種にわたる作業を 1 台のロボットで行うことで、作業が効率的で、スムーズになり、数人分の仕事ができるようになった。また、経済的な負担も減少し、安全性が向上した。研削作業を行うグライディングロボットでは、力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 [4]。しかし、グライディングのような接触作業に対して、非拘束状態に対する制御法で運動制御を行うと、わずかな軌道追従偏差から大きな駆動力が発生してしまう。また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。さらに、力センサはとても高価なものであり、破損すると多大な損害をおってしまう。そこで、本研究では力センサを用いずにフィードフォワード制御とフィードバック制御 [5] により力制御と位置制御を同時に行っている。

そして、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所の廃炉作業を行うために、自律的に放射能汚染機械部品の研削除染作業が行えるロボットシステムの構築が必要となっている。今後、福島第一原子力発電所にある原子炉全基の廃炉措置を行う際に、大量の汚染がれきが発生するものと想定されている [7]。一般的に 110MW 級の原子力発電所の解体時に発生する廃棄物発生量は約 54 万トン（うちコンクリート約 50 万トン、金属約 4 万トン）と推定されている [8]。この中の 97% の汚染物を、人体への影響が年間線量 0.01[mSv] 以下であれば放射性廃棄物として処分しなくてもよく、再利用できるというクリアランスレベルまで低放射化できれば、大量に発生する汚染がれきを減容化できる可能性を有している [9]。しかし、福島第一原子力発電所におけるがれき撤去作業は、950mSv/h を越える高線量下

作業であるとともに、1~6 号全基の廃炉作業時に発生するがれき発生量を鑑みた場合、ロボットによる研削除染作業が必須であり、この作業をロボットが自律的に実行してくれることが望ましい。しかしながら、現在のロボット技術では、爆発により破壊・破損した結果不定形化した除染対象物の認識が難しくなっており、その対象物の汚染箇所の除染が実行できない。

そこで本論文では対象物の形状を把握するために、はじめにグライディングロボットで対象物をなぞることで対象物の表面形状を取得する。次にグライディングロボットの手先から取得したデータをベジエ曲線を使って推定し、推定した対象物の形状データを用いてグライディングロボットで研削する。また本研究の目的は対象物の表面研削であり大まかな研削ができればよい。そのため精密な研削は必要としない。

2 グライディングロボットの概要

Fig.1 に実験装置であるグライ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る。マニピュレータの先端には、グライダと力センサを取り付けている。力センサは手先に発生した拘束力を計測し、位置・力制御には用いていない。

2.1 拘束運動のモデリング

拘束運動のモデルを Fig.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。

$$C(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = 0 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{r} は拘束を受けるリンクの位置ベクトル、 \mathbf{q} はリンクの角度を表す。



Fig.1 Grinding robot

拘束力が作用するモデルの運動方程式は式 (2) のように表される。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_C^T \mathbf{f}_n - \mathbf{J}_R^T \mathbf{f}_t \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_C^T = \frac{\left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}}\right)^T}{\left\|\frac{\partial C}{\partial \mathbf{r}}\right\|}, \quad \mathbf{J}_R^T = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}}\right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}}{\|\dot{\mathbf{r}}\|}$$

ここで、 \mathbf{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、 \mathbf{h} はコリオリ力・遠心力、 \mathbf{D} は粘性摩擦係数、 \mathbf{g} は重力の影響を表すベクトルであり、 $\boldsymbol{\tau}$ はリンクの駆動トルク、 \mathbf{f}_n は拘束力、 \mathbf{f}_t は摩擦力を表す。また、 $\mathbf{J}_C^T \mathbf{f}_n$ 、 $\mathbf{J}_R^T \mathbf{f}_t$ はそれぞれ手先にかかる拘束力、摩擦力によって各関節にかかるトルクを表している。

また、Fig.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 \mathbf{f}_n は、

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{a}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{J}_R^T \mathbf{f}_t - \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

となる。ここで、

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

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) \triangleq m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \mathbf{r}} \right\| \left\{ \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right) \mathbf{M}^{-1} \right\} \quad (5)$$

$$m_c \triangleq \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right) \mathbf{M}^{-1} \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \quad (6)$$

とおく。 $\mathbf{a}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はスカラー、 $\boldsymbol{\tau}$ を含まない項の和、 $\mathbf{B}(\mathbf{q})$ は $\boldsymbol{\tau}$ の係数ベクトルである。上式より拘束力 \mathbf{f}_n は \mathbf{q} 、 $\boldsymbol{\tau}$ と \mathbf{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 \mathbf{f}_n が \mathbf{q} 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 \mathbf{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 \mathbf{q} 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 \mathbf{f}_t を観測することができ、理想的には \mathbf{f}_n を実現できる入力 $\boldsymbol{\tau}$ を決定できることを意味している。

式 (3) より、拘束力 \mathbf{f}_n の目標値 \mathbf{f}_{nd} を実現する $\boldsymbol{\tau}$ は、

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{B}^+(\mathbf{q}) \{ \mathbf{f}_{nd} - \mathbf{a}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{J}_R^T \mathbf{f}_t \} + \{ \mathbf{I} - \mathbf{B}^+(\mathbf{q})\mathbf{B}(\mathbf{q}) \} \mathbf{k} \quad (7)$$

と求めることができる。 $\mathbf{B}^+(\mathbf{q})$ は $\mathbf{B}(\mathbf{q})$ 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 \mathbf{f}_{nd} を実現するトルク $\boldsymbol{\tau}$ のノルム最小値を与える。また第二項は \mathbf{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

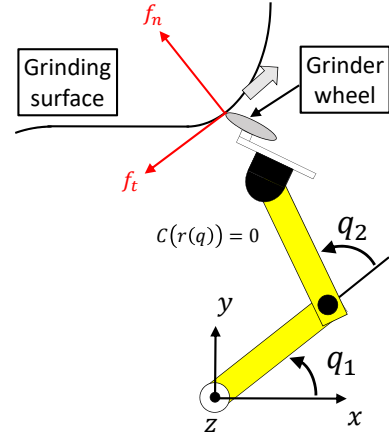


Fig.2 Grinding robot model

て上式は \mathbf{f}_{nd} を実現する入力 $\boldsymbol{\tau}$ が \mathbf{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 \mathbf{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、

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

と決定する。 \mathbf{K}_P は比例ゲイン行列であり、 \mathbf{K}_D は微分ゲイン行列である。また \mathbf{r}_d は拘束条件を満たすハンドの目標軌道である。式 (8) の \mathbf{k} がいかなる値のときも式 (7) で算出される $\boldsymbol{\tau}$ を式 (3) に代入することで $\mathbf{f}_n = \mathbf{f}_{nd}$ となる。

3 実機実験

実験装置を Fig.3 に示す。対象物に対して適切な研削開始位置等を初期条件として与え、それ以降は実際の手先位置の軌跡から直線近似によって逐次的に拘束条件を推定し制御をおこなう。グラインディングロボットは平面 2 リンクマニピュレータであり 3 次元研削が行えない。そこで多関節ロボットの手先に対象物を取り付け、対象物を移動させることで 3 次元研削を目指す。1 回の研削作業を終えた後、多関節ロボットによって対象物を移動させて再び研削作業を行う。これを繰り返して表面全体をなぞることで対象物の表面形状を取得する。

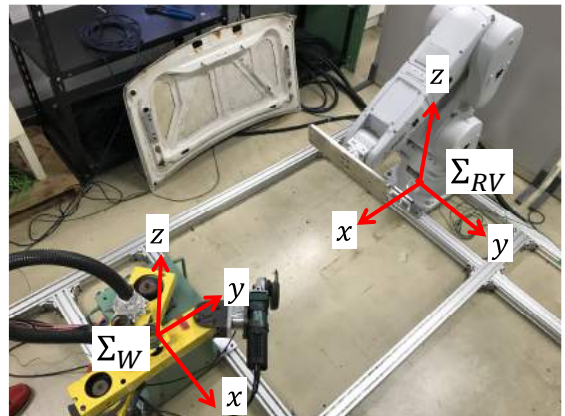


Fig.3 Experimental device

3.1 形状取得実験

対象物は Fig.4 に示す厚さ 4[mm] のステンレス製の板を用いる。グラインディングロボットの制御周期が 0.56[ms] で、研削時間を 10[s]、研削範囲を ${}^Wx = [0, 200][\text{mm}]$ とする。制御周期ごとに手先位置を取得することができるが、今回の実験では制御 100 回につき 1 回のサンプリングを行う。1 回の研削作業を終えた後、多関節ロボットによって対象物を移動させて再び研削作業を行うことを 4 回繰り返した。Fig.5 に今回の実験で形状取得の範囲を示す。Fig.6 に多関節ロボットの座標系を示す。得られ

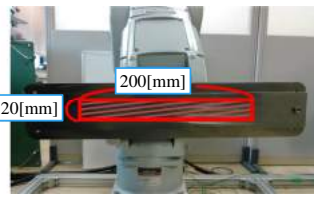


Fig.4 A plate as an object

Fig.5 Grinding areas

た手先データを同次変換行列を用いて多関節ロボットの手先座標系に座標変換する。多関節ロボットの手先に座標変換し、3次元にプロットした図を Fig.7 に示す。

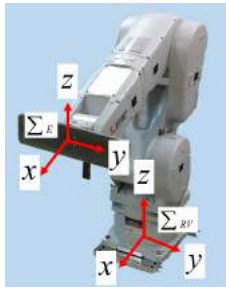


Fig.6 Coordinate system of RV-20F

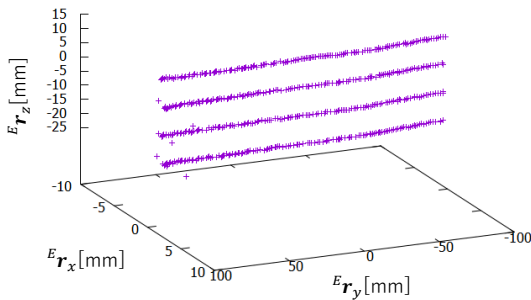


Fig.7 Position of hand from Σ_E

3.2 ベジエ曲面

曲線の近似表現にはスプライン曲線やベジエ曲線などがあげられる。簡単な曲線を生成する場合にはスプライン曲線は少ない点で表現できるが、ベジエ曲線は多くの点が必要になる。複雑な曲線を生成するには、スプライン曲線は多くの点が必要になるが、ベジエ曲線は少ない点で生成できる。今後の実験でステンレス板よりも複雑な表面形状を推定することを考えて、今回はベジエ曲線を用いて形状推定を行う。

取得したデータから対象物の形状を推定するために双三次ベジエ曲面を用いて形状推定をする。この曲面は 16 個の点が与えられたときに生成され以下の式で表すことができる。

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(w) b_{ij} \quad (9)$$

$B_i^3(u)$ はベルンシュタイン多項式と呼ばれ、N 次のベルンシュタイン多項式は以下のように定義される。

$$B_i^n(t) = {}_n C_i t^i (1-t)^{n-i} \quad (10)$$

3.3 ベジエ曲面の生成

取得したステンレス板のサンプリングデータからベジエ曲面を生成する。生成方法の手順として

- 1, 得られたデータから対象物と関係のない点を削除する。
- 2, 双三次ベジエ曲面の生成に用いる点群を選択する。
- 3, 点群からベジエ曲面を生成する。16 個の点群から一つのベジエ曲面を生成する。

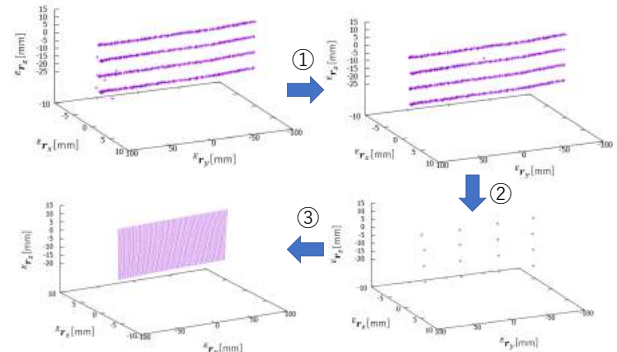


Fig.8 Sampling data of the plate

3.4 考察

結果として今回の対象物である鉄板に似た平らな形状にベジエ曲面を用いて形状推定することができた。Fig. 5 に示す縦 20[mm] 横 200[mm] の範囲を形状推定できた。グラインディングロボットでなぞった範囲内において、平らな面をベジエ曲面を用いて生成することができたので対象物の形状を推定することができたと考ええる。

3.5 研削実験

推定したステンレス板の形状データを用いて実際に研削を行う。今回の研削実験では形状推定した範囲をすべて研削するのではなく一部分を研削する。Fig.9 に研削範囲を示す。Fig.10 に基準座標系から見たグラインディングロボットの手先の x 位置を、Fig.11 に y 位置を示す。Fig.12 にグラインディングロボットの手先に発生した拘束力を示す。

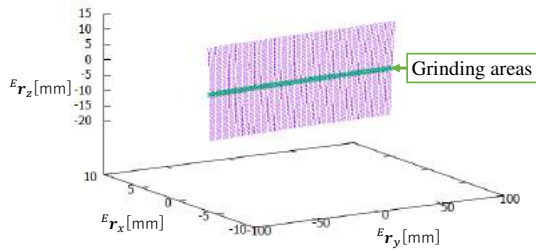


Fig.9 Grinding areas

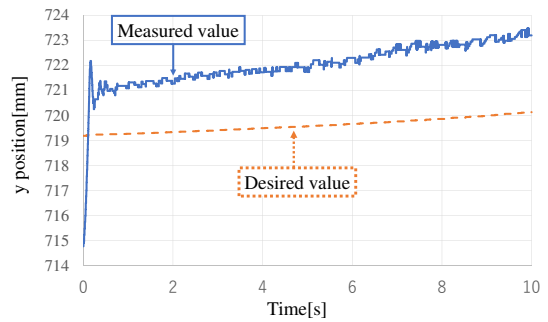


Fig.11 y position data

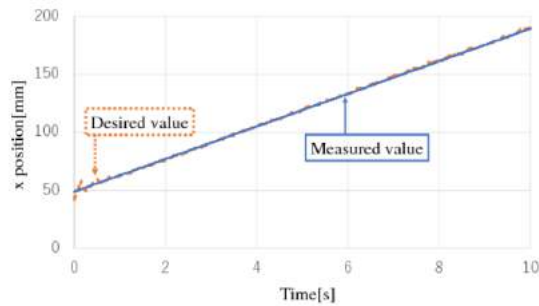


Fig.10 x position data

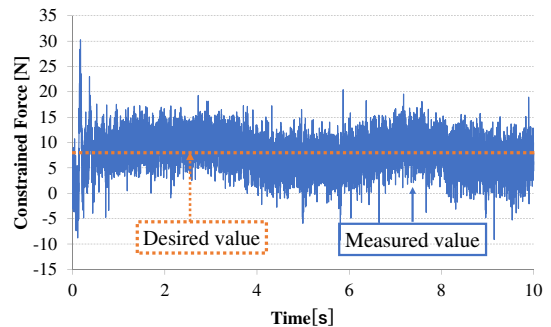


Fig.12 Constrained force

3.6 考察

Fig.10 に関して目標軌道とほとんど誤差なく研削が行えている。Fig.11 に関して 2[mm] の誤差を保持のまま研削が行っていることがわかる。これは実際に研削を行い対象物が削れたことによってグラインディングロボットの手先が目標値より大きくなったと考える。Fig.12 に関して目標とする 8[N] に近い拘束力が発生した。平均拘束力は 8.23[N] となり、力制御ができたと考える。

4 結言

今回ステンレス板の表面形状をベジエ曲面によって推定し、推定した形状データをもとに表面研削を行った。ベジエ曲面による形状推定に関して対象物と同様の平らな形状を作成できたため、今後の実験においてもベジエ曲面を用いて任意対象物の形状推定を行う。研削結果に関して誤差は出たが研削を行うことができたので、今後別の対象物を使用して今回と同様の実験ができるかを確認する。

参考文献

- [1] 吉見卓, 神野誠, 阿部朗, " グラインダ作業ロボット ", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.106-109, 1991.
- [2] 神野誠, 吉見卓, 阿部朗, " 遠隔グラインダ作業ロボットの研究 ", 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.106-115, 1992.
- [3] 山口雅行, " バリ取りロボットシステムにおける加工送り速度制御 ", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, pp.349-342, 1991. Vol.17, No.7, pp.983-992, 1999.
- [4] 小菅一弘, " 力制御の分類と制御システムの設計法 ", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.751-758, 1991.
- [5] 吉川恒夫, " ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御 — 手先拘束の記述と関節駆動力の算出 — ", 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp.531-336, 1985.
- [6] Ken Adachi, Mamoru Minami, Akira Yanou: "Improvement of Dynamic Characteristics during Transient Response of Force-sensorless Grinding Robot by Force/Position Control" IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp.710-715, August 4-7, 2013.
- [7] 独立行政法人 日本原子力研究開発機構, " 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務除染技術実証試験事業報告書 ", <http://fukushima.jaea.go.jp>, 2012.

- [8] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, " 放射性廃棄物の処分について ", <http://www.rwmc.or.jp/disposal/radioactive-waste/09.html>
- [9] 環境省 放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト, " 指定廃棄物とは ", <http://shiteihaiki.env.go.jp/faq/>