任意形状対象物のグラインディングロボットシステムの構築

Construction of Robot System for Arbitrary Shape Grinding

佐藤篤 (岡山大)

正 見浪護(岡山大) 正 松野隆幸(岡山大) Takuro IZUMI, Okayama University, pb626u3s@s.okayama-u.ac.jp Atsushi SATO, Okayama University Mamoru MINAMI, Okayama University Takayuki MATSUNO, Okayama University

Industrial robots are used for many purposes, especially as machining facilities. For example, there are welding, assembling and grinding operations. Many of grinding robots are controlled by using feedback control with force sensors. But, the force sensor used for force detection by means of strain gage may be easily damaged when a shock on big power be added. Therefore, this research has been trying to control a position and exerting force at the same time without using a force sensor by feedforward/feedback control. In addition, we aim to construction a system that recognizes the arbitrary shape object and autonomously grind it by using the recognition technology of 3D space with camera. Until last year, the grinding robot could only grind on the 2D plane. Therefore, this paper shows the construction of the new robot system enabling grinding a target with 3D shape.

Key Words: Grinding, Robot system, Arbitrary shape, Manipulator

和泉卓朗(岡山大)

Ο

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.研削作業を行うグラインディ ングロボットでは,グラインダを対象物に適切な力で押し付ける 必要があるが,これは力センサを用いてフィードバックによって 制御を行うものが多く見られる[4].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恐れがある.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[5]により位置と力 の同時制御を行っている[6].

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 [7]. 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. 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.研削除染作 業を行うためには、未知形状である金属構造物の表面形状を知る 必要がある.

そのため、本研究はカメラを用いた3次元空間の認識技術を 用いて対象物の形状を認識し、任意形状対象物を自律的に研削す ることが可能なシステムの構築を目指している.

昨年までの研究成果によってグラインディングロボットは任意

の拘束力で対象物を研削することができる.しかし,以前までの ロボットシステムでは2次元平面での研削しか行うことができな かった.そこで,本報では3次元空間での研削が可能となる新し いロボットシステムを構築したので述べる.

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る.マニピュレータ の先端には、グラインダと力センサを取り付けており、力センサ は手先に発生した拘束力を計測している.なお、力センサは手先 に発生した拘束力の計測のみに使用し、位置・力制御には用いて いない.



Fig.1 Grinding robot

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.

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

$$\boldsymbol{J}_{C}^{T} = \frac{\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{T}}{\left\|\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|}, \quad \boldsymbol{J}_{R}^{T} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^{T} \frac{\dot{\boldsymbol{r}}}{\left\|\dot{\boldsymbol{r}}\right\|}$$

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 f_n*, *J_R^T 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,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,

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

となる.ここで,

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

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \stackrel{\triangle}{=} m_c^{-1} \left\| \frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}} \right\| \left\{ \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \boldsymbol{M}^{-1} \right\}$$
(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, τ と f_t に従属し て定まることがわかる.



Fig.2 Grinding robot model

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 新しいロボットシステムの構築

以前までのロボットシステムでは2次元平面での研削しか行 うことができなかった.そこで、3次元空間での研削を可能とす るための新しいロボットシステムの構築を行った.

3.1 以前のロボットシステム

以前までのロボットシステムを図3に示す.研削対象物はグラ インディングロボットの前に垂直に設置されている金属の台に固 定されている.実験に使用した研削対象物は主に薄い鉄板である. 以前のロボットシステムでは,対象物が固定されているため細い 対象物しか研削できなかった.また,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,xy平面上を動く.この 環境において研削対象物を台に固定し,任意の拘束力で研削する という実験を行ってきた.しかし,グラインディングロボット単 体では高さ方向の研削を行うことができなかった.

研削対象物の画像認識に関して、昨年までの研究成果では、図 4のように固定されたカメラによって2次元未知形状対象物を一 方向から認識することによって形状を認識し、2次元研削を行う ことに成功している.



Fig.3 Previous robot system

3.2 新しいロボットシステム

新しく構築したロボットシステムには、新たに図5に示す産業 用ロボット RV-20Fを2台用いる. RV-20F は垂直多関節形であ り、動作自由度6軸、可搬質量は最大20[kg] となっている.

研削対象物とカメラを RV-20F に固定し, RV-20F によって自 由度を与えることで三次元空間での研削を可能とするロボットシ ステムに変更した.実際に構築したロボットシステムを図 6 に 示す.図7にロボットシステムの概略図を示す.RV-20F は 2 台 使用するが,カメラを取り付け画像認識させる RV-20F をハン ドA,研削対象物を取り付ける RV-20F をハンド B と呼称する. ハンド B の手先には研削対象物を取り付ける.また,ハンド A の手先にはカメラを取り付け画像認識を行い研削対象物の形状 を読み取る.未知形状対象物の研作実験を行う際は,図 8 のよ



Fig.4 Experimental device



Fig.5 RV-20F

うにハンド A が研削対象物の周りを動き,全体の形状を認識す る.そして,図9のように対象物が取り付けられたハンド B が 動くことで対象物の位置を変更させ,グラインディングロボット が任意の拘束力で全体を研削する.このような自律的な研削が可 能となるシステムの構築を行った.グラインディングロボットと 2 台の RV-20F は1台の制御用 PC で制御を行う.制御用 PC と RV-20F は1 台の制御用 PC で制御を行う.制御用 PC と RV-20F は1 ーサネットケーブルで接続されており,TCP/IP 通 信によって制御用 PC から目標位置を指令して,RV-20F を操作 する.



Fig.6 Robot system

3.3 研削対象物の認識

研削対象物の認識は、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.

今後の研究では3次元での研削を行うため、未知形状対象物 を3次元認識する必要がある.そこで、RV-20Fによってカメラ に自由度を与えることで他方向から3次元未知形状対象物の全体 の形状を認識し、3次元研削を行うことを目指している.



Fig.7 Schematic of robot system



Fig.8 Schematic of recognition

4 実機実験

新しく構築したロボットシステムによって実験を行った.今回の実験では、研作対象物の位置と形状を既知として与えたため認識のためのハンドAは使用しない.研削対象物に用いたボンネットを図10に示す.矢印の向きに研削を行う.

位置・力同時制御を行い、対象物を任意の拘束力で研削を行う. 実験は、目標拘束力を10[N]、研削長さを100[mm]、研削時間を 5[s] で行う.実際の研削実験の様子を図11に示す.

実験より,得られたグラインディングロボットの手先位置の *x* 座標, *y* 座標をそれぞれ図 12,図 13 に示す.また拘束力を図 14 に示す以上の結果より任意の拘束力におけるボンネットの研削実験を行うことができた.図 12 より,*x* 座標に関しては,ほぼ誤差なく位置制御を行えていることが分かる.図 13 より,*y* 座標に関しては 0.01[m] ほどの誤差が生じてしまった.しかし,図 14 より,得られた拘束力の平均値を求めると 9.8[N] となり目標拘束力に近い値を示すことができた.

5 結言

新しく構築したロボットシステムによって任意の拘束力による ボンネットの研削をグラインディングロボットと RV-20F を使用 することで行うことができた.今回は、ボンネットの位置と形状 を既知として与え、研削実験を行った.今後はカメラを用いた3 次元空間の認識技術を用いて対象物の位置・形状を認識し、対象 物を取り付けた RV-20F を動かすことによって3次元的な研削 を自立的に行うことが可能なシステムの構築を目指す.

参考文献

- 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.



Fig.9 Schematic of grinding



Fig.10 Grinding object

- [6] 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.
- [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編 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/



Fig.11 Grinding experiment



Fig.12 X position data



Fig.13 Y position data



Fig.14 Constrained force