RSJ2016AC3E1-01

フィードフォワード制御を用いた2リンクマニピュレータによる研削実験

○佐藤篤 (岡山大学)　西彩那 (岡山大学)　見浪護 (岡山大学)　松野隆幸 (岡山大学)

1.　諸言

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，塗装作業などがあり，研削作業においても多くの研究がなされている [1][2][3][4][5]．研削作業時に発生する粉塵は，作業者の健康を害する恐れがあり大きな負担になる．品質の均質化，省力化の面や，原子力発電所内部のような人間が作業することが望ましくない環境下での研削作業ために，自律的に研削作業を行うロボットの実現が望まれている．

研削作業を行うグラインディングロボットでは，グラインダを対象物に適切な力で押し付ける必要があり，これを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．しかし，グライン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．また力センサによる検出信号は多くのノイズを含むことから制御系が不安定になりやすく，さらに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容易に破損するおそれがある．

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により位置と力の同時制御を行っている [6]．力センサを用いないフィードフォワード制御による研削実験を行い，その結果と，研削抵抗がグラインディング作業に及ぼす影響について述べる．

1.1　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．第 1 リンクは 400[W] の交流モータによって，第 2 リンクは 200[W] の交流モータによって駆動される．モータ電源 200[V] の交流電源を用いている．各モータ (安川電機製) はトルク指令モードで使用している．図 2 に示すように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．

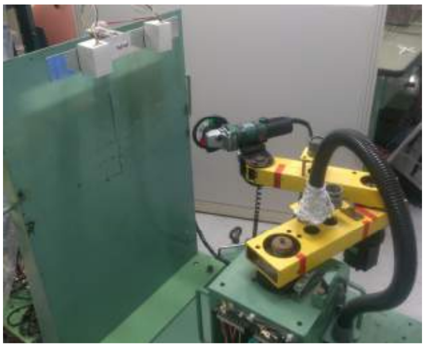


図 1　グラインディングロボット

図 2　手先部ディスクグラインダー

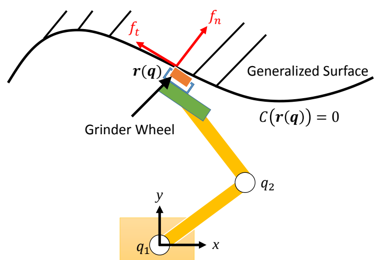


図 3　拘束運動のモデル

2.　拘束運動のモデリング

グラインディング作業では，手先部が研削対象物と常に接触している．このような拘束運動をモデル化する．拘束運動のモデルを図 3 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，$\boldsymbol{r}$ は拘束を受けるリンクの位置ベクトル，$\boldsymbol{q}$ 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．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{J}_C{}^T f_n - \boldsymbol{J}_R{}^T f_t \tag{2}$$

$$\boldsymbol{J}_C{}^T = \frac{\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T}{\left\|\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{J}_R{}^T = \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T \frac{\dot{\boldsymbol{r}}}{\|\dot{\boldsymbol{r}}\|} \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{M}$ は実機 (Fig.2) が 2 リンクマニピュレータであるので 2×2 の慣性行列，$\boldsymbol{h}$ はコリオリ力・遠心力，$\boldsymbol{D}$ は粘性摩擦係数，$\boldsymbol{g}$ 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，$\boldsymbol{J}_C{}^T$，$\boldsymbol{J}_R{}^T$ はそれぞれ拘束力 f_n，摩擦力 f_t の係数を表す．また，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) を時間 t で 2 階微分し一般化座標の速度，加速度が満たされなければならない条件を求めると，

拘束条件式の 1 階微分は

$$\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}} = 0 \tag{5}$$

となり，拘束条件式の 2 階微分は

$$\left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}}\right]\dot{\boldsymbol{q}} + \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\ddot{\boldsymbol{q}} = 0 \tag{6}$$

となる．

式 (6) を $\dot{\boldsymbol{q}}$，$\ddot{\boldsymbol{q}}$ でまとめると次式が得られる．

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\left[\dot{\boldsymbol{q}}^T,\ddot{\boldsymbol{q}}^T\right]^T = 0 \tag{7}$$

ここで，$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ は，拘束運動 $\left[\dot{\boldsymbol{q}}^T,\ddot{\boldsymbol{q}}^T\right]^T$ と直行する 1×4 の行ベクトルである．また，式 (2) を式 (6) に代入すると，

$$-\dot{\boldsymbol{q}}^T\left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}}\right] + \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{h}+\boldsymbol{g}-\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{J}_R{}^T f_t\right] = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T\right]\frac{f_n}{\left\|\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|} \tag{8}$$

が得られる．これは，式 (2) の $\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}$ が常に式 (6) を満足しつつ運動する条件であり，状態変数 $\left[\dot{\boldsymbol{q}}^T,\ddot{\boldsymbol{q}}^T\right]^T$，一般化入力 $\boldsymbol{\tau}$，拘束力 f_n を含んでいる．C が独立な拘束条件であることと，$\boldsymbol{M}^{-1}$ が正定行列であることより，f_n の係数 $\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T$ は $\boldsymbol{q}$ に関わらず正値であるため，式 (8) は f_n に関して一意に解くことができる．

$$m_c \triangleq \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T \tag{9}$$

とおくと，拘束力 f_n は，

$$f_n = a(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_R{}^T f_t - \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\tau} \tag{10}$$

となる．ここで，

$$a(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \triangleq m_c{}^{-1}\left\|\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|\left\{-\dot{\boldsymbol{q}}^T\left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}}\right] + \left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{h}+\boldsymbol{g})\right\} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}) \triangleq m_c{}^{-1}\left\|\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|\left\{\left(\frac{\partial C}{\partial \boldsymbol{q}}\right)\boldsymbol{M}^{-1}\right\} \tag{12}$$

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

3. 位置力同時制御

ハンド拘束運動のモデリングの中で得られた式 (10) は f_n が $\boldsymbol{q}$，$\dot{\boldsymbol{q}}$，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 $\boldsymbol{q}$，$\dot{\boldsymbol{q}}$，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 $\boldsymbol{\tau}$ を決定できることを意味している．

式 (10) より，拘束力 f_n の目標値 f_{nd} を実現する $\boldsymbol{\tau}$ は，

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{B}^+(\boldsymbol{q})\{f_{nd} - a(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_R{}^T f_t\} + \{\boldsymbol{I} - \boldsymbol{B}^+(\boldsymbol{q})\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\}\boldsymbol{k} \tag{13}$$

と求めることができる．$\boldsymbol{B}^+(\boldsymbol{q})$ は $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})$ の擬似逆行列である．

ここで任意ベクトル $\boldsymbol{k}$ 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，

$$\boldsymbol{k} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}}\right)^T\{\boldsymbol{K}_P(\boldsymbol{r}_d - \boldsymbol{r}) + \boldsymbol{K}_D(\dot{\boldsymbol{r}}_d - \dot{\boldsymbol{r}})\} \tag{14}$$

と決定する．$\boldsymbol{K}_P$ は比例ゲイン行列であり，$\boldsymbol{K}_D$ は微分ゲイン行列である．また $\boldsymbol{r}_d$ は拘束条件を満足するハンドの目標軌道である．式 (14) の $\boldsymbol{k}$ がいかなる値のときも式 (13) で算出される $\boldsymbol{\tau}$ を式 (10) に代入することで $f_n = f_{nd}$ となることが確認できる．

4. 研削抵抗力を考慮した研削

前章で，$\boldsymbol{q}$，$\dot{\boldsymbol{q}}$，f_t を観測し，入力 $\boldsymbol{\tau}$ を決定できることを述べた．ここで研削抵抗力 f_t を垂直抗力すなわち拘束力に比例した力と仮定し，研削抵抗係数を K_t とし，研削抵抗力 f_t を以下の式で表すとする．

$$f_t = K_t f_{nd} \tag{15}$$

制御式 (13) において式（15）を用いて研削抵抗力を表すとき，拘束力を表す式 (10) に代入することにより，拘束力 f_n と目標拘束力 f_{nd} の関係は

$$f_n = f_{nd} + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{j}_t^T(f_t - K_t f_{nd}) \tag{16}$$

となる．よって式 (16) より右辺の第 2 項が目標拘束力との誤差にあたることがわかる．$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{j}_t^T$ はロボット

の姿勢によって決定される．ロボットの軌道が同じ実験を行うとき，実験結果から得られる実際の拘束力と目標との誤差は，$(f_t - K_t f_{nd})$ に比例した値となると考えられる．本報告では，実験から拘束力の誤差を減少させるような研削抵抗力を求め，そのときの制御性能を確かめる．

4.1　一定拘束力による鉄板研削実験

図 4 に実験環境の概略図を示す．研削対象物として図 5 に示す鉄板を用いる．この研削対象物を実験環境に設置した．ロボットの姿勢の変化が同一となるように実験条件を整える．図 6 に研削中の様子を示す．

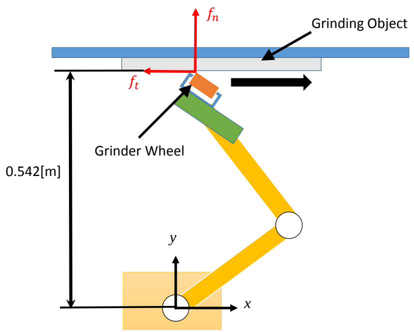


図 4　実験装置の配置図

図 5　研削対象物

図 6　研削実験の様子

4.2　研削抵抗係数の導定

目標拘束力を一定として，研削抵抗係数を変化させる．このとき目標拘束力と実際の拘束力との誤差がなくなる研削抵抗係数を実験から求める．ロボットの姿勢の変化が一定となる条件で目標拘束力を $f_{nd} = 10$[N] として，研削抵抗係数 K_t の値を 0.1〜0.6 まで 0.1 ずつ変化させて研削を行いそのときの拘束力の実測値の平均を調べた．図 7 にそれぞれの研削抵抗係数における拘束力の平均値を示す．図 7 のグラフから導出される近似直線と x 軸との交点から目標拘束力を達成する際の K_t の研削抵抗を 0.192 とする．

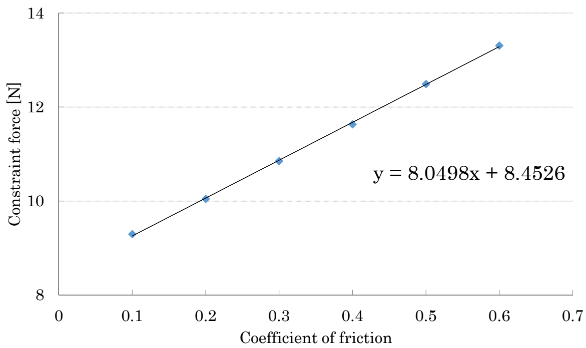


図 7　拘束力

表 1　各研削抵抗係数における目標拘束力との誤差

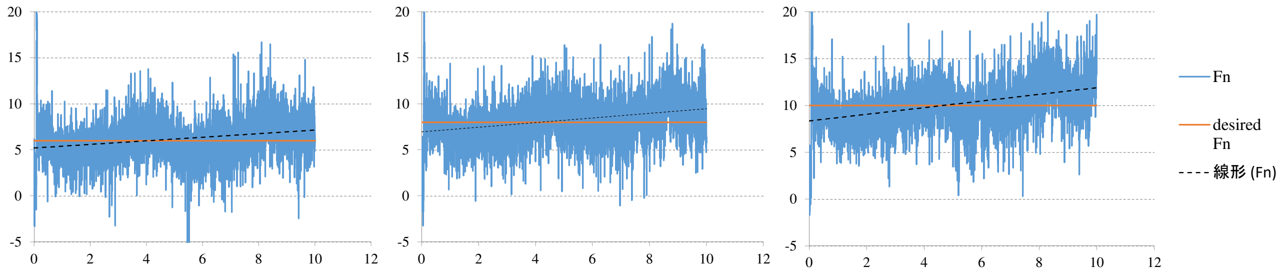
K_t	f_n[N]	$f_{nd} - f_n$[N]
0.1	9.30	-0.70
0.2	10.05	0.05
0.3	10.85	0.85
0.4	11.63	1.63
0.5	12.49	2.49
0.6	13.31	3.31

表 2　実測拘束力と目標との誤差

f_{nd}[N]	f_n[N]	$f_n - f_{nd}$[[N]
6	6.19	0.19
7	7.15	0.15
8	8.22	0.22
9	8.94	-0.06
10	10.13	0.13

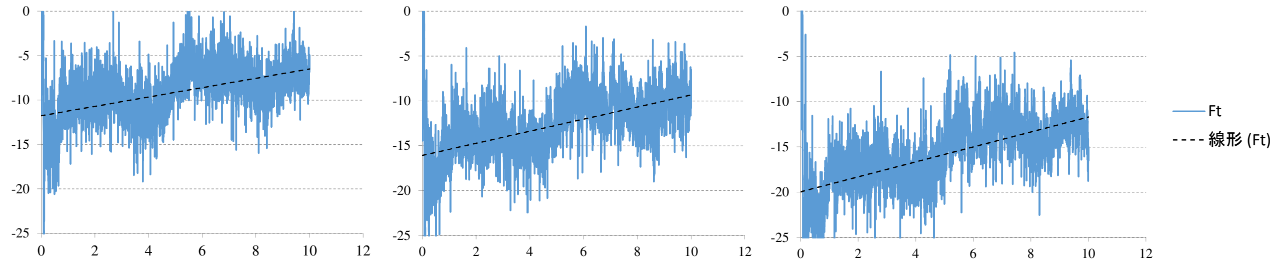
4.3　導出した研削抵抗係数の検証

求めた研削抵抗係数を用いた制御によって，任意の拘束力を達成できるはずである．研削抵抗係数 K_t の妥当性を検証するために，目標拘束力 f_{nd} の値を 6〜10[N] まで変化させ，研削を行い，そのときの拘束力の実測値と研削抵抗の変化を調べた．K_t を 0.192 と設定しその他の実験環境や条件は前節と同様で，目標拘束力 f_{nd} のみ変化させた．表 2 に実測された拘束力の平均値と目標との誤差を示す．また研削中の実際の拘束力の推移を，目標拘束力 6[N] および 10[N] の場合を代表として図 8，図 9 に示す．



(a) Fn=6 [N]　(b) Fn=8 [N]　(c) Fn=10 [N]

図 8　拘束力の実測値



(a) Fn=6 [N]　(b) Fn=8 [N]　(c) Fn=10 [N]

図 9　研削抵抗力の実測値

4.4　考察

式 (16) から実験結果から得られる実際の拘束力と目標との誤差は，$(f_t - K_t f_{nd})$ に比例した値となることが予想された．図 7 から実際の拘束力と目標との誤差は 1 次比例の形で現れることがか確認できた．しかし図 8 から破線で表される拘束力の線形近似直線から，拘束力は時間とともに増加していくことがわかる．これは実験装置が 2 リンクマニピュレータであり，位置によって研削対象とディスクグラインダーの角度が変化しており，図 9 の研削抵抗力の実測値のグラフからわかるように研削抵抗力を変化させるためと考えられる．

5.　結言

本報告では研削実験により，研削抵抗がグラインディング作業に及ぼす影響について述べた．．K_t と誤差のグラフの近似直線より適切な K_t の値が 0.192 であると算出し，それを用いて目標拘束力を変化させて研削を行うことにより，K_t の値の妥当性を検証し，拘束力の平均値は目標拘束力を満たすことを確認した．

参　考　文　献

[1] 谷本圭司，則次俊郎，”自由曲面を目標形状とする溶接ビード仕上げロボットの開発 ”，日本ロボット学会誌，Vol.23， No.7， pp.831-838， 2005．

[2] 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．

[3] 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．

[4] 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．

[5] 林 浩一郎，上 野 光，村 上 弘 記，”精密仕上げロボットシステムの開発”，計測自動制御学会論文集 Vol.51, No.1, 32/40，2015

[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.