

## 操作性を考慮した人間協調ロボットの制御

### Control of Robot in Cooperation with Human with Considering Manipulability of Handling Object

小菅一弘\*, ○風村典秀\*

Kazuhiro KOSUGE\*, ○Norihide KAZAMURA\*

\*東北大学大学院工学研究科

\*Faculty of Engineering, Tohoku University

キーワード : 人間-ロボット協調 (Human-Robot Cooperation), 力制御 (Force Control), 運動生成 (Motion Generation), 操作性 (Manipulability),

連絡先 : 〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉, 東北大学大学院 工学研究科 機械知能工学専攻 ロボット工学講座, 風村典秀, Tel.& Fax: (022)217-6917, E-mail: kazamura@irs.mech.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

現在, 多くのロボットが様々な分野で活躍している. しかし, ロボットのほとんどは人間から隔離された状態で, 決められた作業のみを行っている. あらかじめ決められた作業だけでなく, 人間の行う作業を手助けするといったような, 人間の生活空間内で, 人間と共存・協調して作業を行うことができるようなロボットが開発されれば, ホームオートメーションや建設分野など, さらに幅広い分野でのロボットの活躍が期待できるであろう.

例えば, Fig.1に示すように, 大きくて重たい物体を搬送するような場合において, 通常ならこの物体を運ぶために2人かそれ以上の作業者が必要となるが, もしロボットと人間との協調して作業が実現できれば, より少ない人数で容易に搬送作業を行うことができるであろう.

人間とロボットによる物体の協調ハンドリング

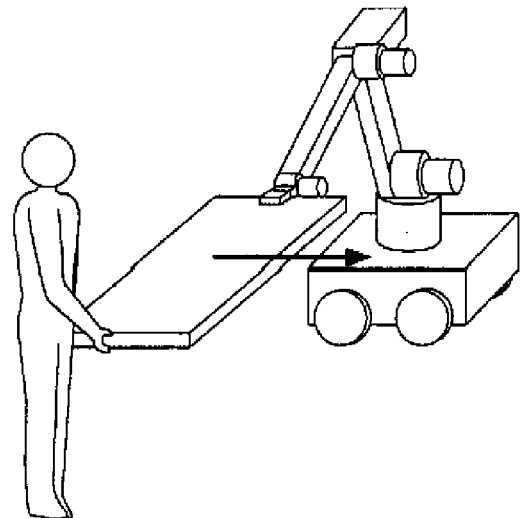


Fig. 1 人間とロボットの協調作業

問題については, これまでにさまざまな研究がなされている. 小菅らは, インピーダンス制御を用いた人間とロボットの協調作業について考察した<sup>3)</sup>. 池浦らは, 人間と協調作業を行うロボットのための, 人間のインピーダンス特性を考慮した制

御方法を提案した<sup>4)</sup>。また、Zhengらは、人間と協調して作業を行うロボットにおける負荷分配の問題について考察を行った<sup>5)6)</sup>。

実際に人間とロボットの協調作業問題を考えるとき、ロボットの運動をどのように制御すれば作業しやすくなるか、という点を考慮する必要がある。そこで、本研究では、操る物体の操作性を考慮したロボットの制御方法について考察をする。ロボットの運動生成法はいくつか考えられるが、運動生成法の違いにより、ロボットの操作性がどのように異なるかを検討するとともに、実験を行い、どのような方法が人とロボットの協調作業に適しているか考察を行う。

## 2. 協調作業システムとその制御問題

本研究では、人とロボットが協調して物体を操るシステムを考える。本研究で対象とするシステムにおいては、Fig.2に示すように、人間とロボットは操る物体を介してのみ相互に作用しあうものと仮定する。すなわち、作業者は物体を移動させたい方向に力（操作力）を加えることで、物体のハンドリングを行うものとする。このようなシステムにおいては、作業者は、操作力のみを加えるだけで作業を行えるので、操る物体の重量に関わ

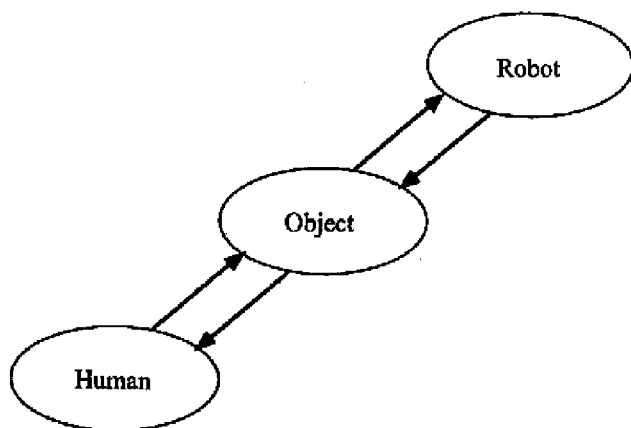


Fig. 2 人間とロボットの関係

らず物体のハンドリング作業を容易に行えることが期待できる。

この協調作業システムを実現するためには、以下のような問題が考えられる。まず、人間のダイナミクスを含んだシステム全体の安定性についての問題が考えられる。小菅らは、インピーダンス制御に基づいた複数のロボットと人間との協調作業システムについて考察を行い、

- 人間はシステムを不安定にするような入力には故意に加えない。
- 人間は外部からの入力に対し受動的である。
- 作業環境は受動的である。

という条件のもとに、作業する人間までを含めた協調作業システム全体の安定性を証明した<sup>7)</sup>。

次に、ハンドリングする物体の操作性についての問題がある。同じように安定性が保証された制御アルゴリズムがいくつか考えられるが、その中で、どのアルゴリズムを用いると物体が操作しやすいか、すなわち、どのアルゴリズムが人間とロボットの協調作業システムに適しているか、ということ考察する必要がある。本研究では、その問題に着目して、物体の見かけの動特性の設計問題、すなわち操作力に基づき物体の運動をどのように生成するか、という問題について考察を行う。

## 3. 操作力による物体の運動生成

### 3.1 運動生成の方法

本節では、操作力に対する物体の見かけの動特性の設計問題について考察する。操作力に基づき、物体の運動を生成する方法としては、以下の方法が考えられる。

- a) 操作力を増幅・減衰して物体に加える方法  
“パワーアシスト型”

この方法は、パワーアシストシステム<sup>1)2)</sup>の

ために提案された方法である。マニピュレータは、物体に加えられた操作力に比例した力を生成するように制御されている。

b) 操作力に基づき物体の位置を生成する方法  
“位置生成型”

この方法では、操作力と物体の位置の関係を制御する。この方法の代表的な例として、剛性制御があげられる。

c) 操作力に基づき物体の速度を生成する方法  
“速度生成型”

この方法では、操作力と物体の速度の関係を制御する。この方法の代表的な例として、ダンピング制御があげられる。

d) 操作力に基づき物体の加速度を生成する方法  
“加速度生成型”

この方法では、操作力と物体の加速度の関係を制御する。この方法の代表的な例として、インピーダンス制御があげられる。

ここで、どの方法が人間とロボットの協調ハンドリングに適しているかを考える。ハンドリング作業をする際に、作業者が操作力を加えたときのみ物体が移動し、物体に操作力が加わらない場合は物体は移動しないようなシステムが、人間とロボットの協調作業に適していると考え、a)やb)の方法は、物体のハンドリング中、作業者は物体に常に力を加え続ける必要があるため、本研究で提案するシステムには適さない。そこで本研究では、c)とd)の方法について検討を行う。簡単のため、ここではc)とd)の方法の典型的なアルゴリズムについて以下考察を進めていく。

c)の方法では、操作力  $F$  に応じた物体の速度  $\dot{x}$  を次式の関係を満たすように生成することにする。

$$F = D\dot{x} \quad (1)$$

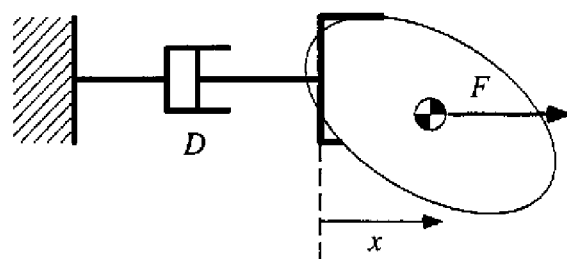


Fig. 3 速度生成型の概念図

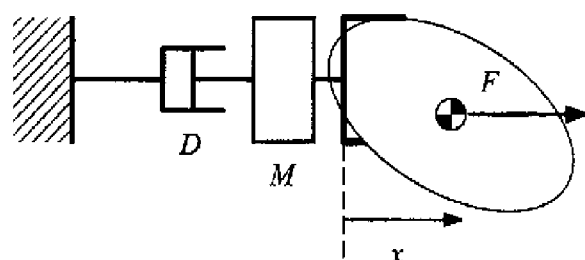


Fig. 4 加速度生成型の概念図

ここで、

- $\dot{x}$  : 物体の速度
- $D$  : 粘性係数行列 ( $D > 0$ )
- $F$  : 物体に加えられる操作力

d)の方法では、操作力  $F$  に応じた物体の加速度  $\ddot{x}$  と物体の速度  $\dot{x}$  を次式の関係を満たすように生成することにする。

$$F = M\ddot{x} + D\dot{x} \quad (2)$$

ここで、

- $\ddot{x}$  : 物体の加速度
- $\dot{x}$  : 物体の速度
- $M$  : 慣性係数行列 ( $M > 0$ )
- $D$  : 粘性係数行列 ( $D > 0$ )
- $F$  : 物体に加えられる操作力

次章では、速度生成型と加速度生成型の制御方法を実際実験システムに適用し、どちらの制御方法が人間とロボットの協調ハンドリング作業に適しているか考察をする。

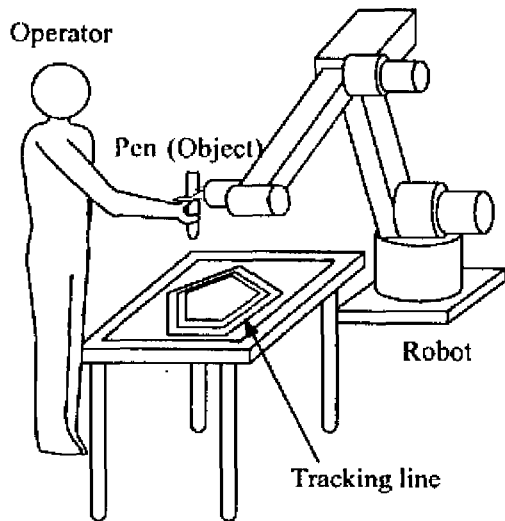


Fig. 5 実験装置

## 4. 実験

### 4.1 実験方法

実際にこれらの方法を協調ハンドリングシステムに適用し、比較実験を行った。Fig.5に示すように、前述した特性を有するようにマニピュレータを制御し、5人の被験者に、マニピュレータの先端に取り付けられたペンに操作力を加えることによって紙面に描かれた図形(円と正方形)をなぞる作業を行わせ、それぞれの制御方法における操作性について意見、感想を尋ねた。

なお、実験には6軸マニピュレータ(不二越製、

Table 1 実験で用いたパラメータ

No.	制御方法	$d$ [Ns/m]	$m$ [kg]
1	速度生成型	100	—
2	加速度生成型	100	5
3	加速度生成型	100	10
4	速度生成型	50	—
5	加速度生成型	50	5
6	加速度生成型	50	10

AP-7603)を用い、またマニピュレータの先端に6軸力トルクセンサを取り付け、作業者が物体に加える操作力を測定する。マニピュレータは仮想内部モデル<sup>8)</sup>を用いて式(1)、(2)で表される見かけのダイナミクスを持つように制御されている。制御用のCPUとしてPentium(166MHz)を用い、制御系の実現にはVxWorksを用いた。またサンプリング周波数は1000Hzである。尚、本実験ではマニピュレータの先端の姿勢は一定とし、並進運動のみに(1)、(2)式の特性を持たせて実験を行った。

ここで、粘性係数行列 $D$ 、慣性係数行列 $M$ は対角行列とし、

$$D = dI$$

$$M = mI$$

のように表されるものとした。なお、 $d(>0)$ 、 $m(>0)$ はそれぞれ粘性係数、慣性係数であり、 $I$ は $3 \times 3$ の単位行列である。実際に実験で用いたパラメータ $d$ 、 $m$ をTable.1に示す。粘性係数が大きい場合と小さい場合の2通りについて、それぞれ速度生成型制御を行った場合と加速度生成型制御を行った場合の実験を行った。

### 4.2 実験結果

各実験における操作性について被験者に感想を尋ねたところ、以下のような結果を得た。

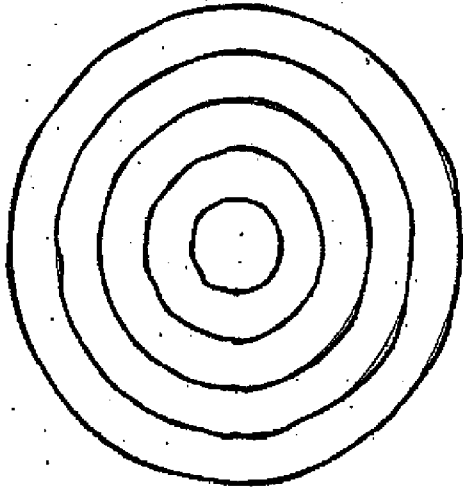


Fig. 6 実験結果(1)—速度生成型,  $d = 100$

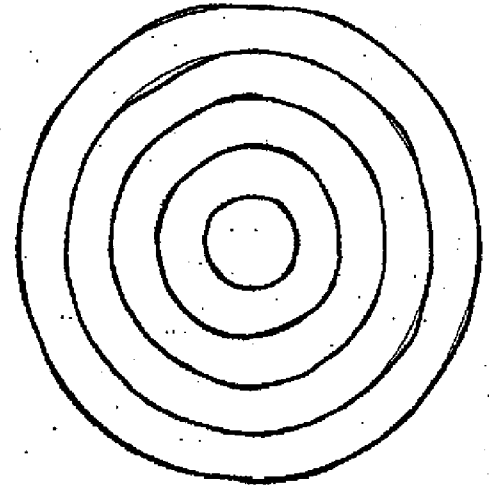


Fig. 8 実験結果(3)—加速度生成型,  $m = 10$ ,  
 $d = 100$

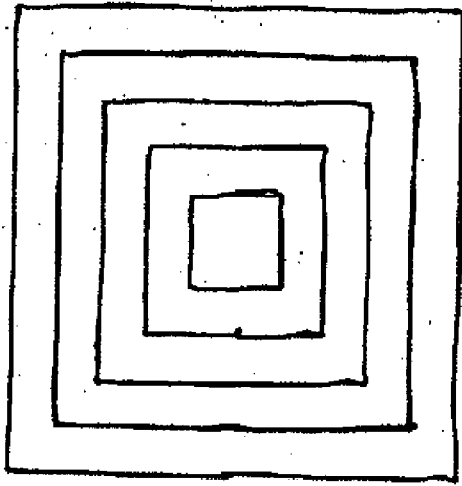


Fig. 7 実験結果(2)—速度生成型,  $d = 100$

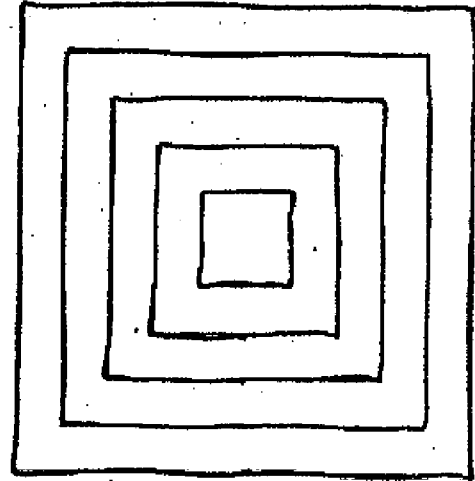


Fig. 9 実験結果(4)—加速度生成型,  $m = 10$ ,  
 $d = 100$

#### 4.2.1 粘性係数が大きい場合

まず、粘性係数が大きい場合( $d = 100[Ns/m]$ )における被験者の感想をまとめる。実験結果の一例をFig.6~Fig.9に示す。この時、ペンの動作は比較的遅く、作業を終了するまでに比較的時間がかった。操作性について被験者から得たコメントをまとめると次のようになった。

- 速度生成型のとき、ペンの動作が多少振動した。
- 操作しやすさ、という点では速度生成型のときと加速度生成型のときでそれほど大きな違いはなかった。
- 実際に描いた図からもそれほど大きな違いは見られなかった。

#### 4.2.2 粘性係数が小さい場合

次に、粘性係数が小さい場合( $d = 50[Ns/m]$ )における被験者の感想をまとめる。実験結果の一例をFig.10~Fig.13に示す。この時、ペンを速く動かすことができ、比較的短時間で作業を終了することができた。このときの操作性について被験者から得たコメントをまとめると次のようになった。

- 実験結果の図(Fig.10, 11)からわかるように、速度生成型のとき、ペンの動作が大きく振動し、操作がしにくくなった。
- 加速度生成型している場合のほうがペンの動作が安定し、操作しやすかった。

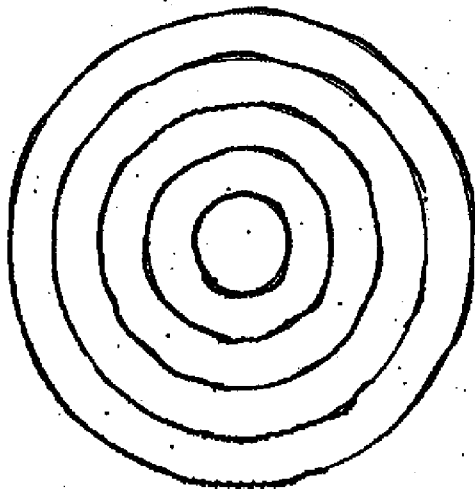


Fig. 10 実験結果(1)—速度生成型,  $d = 50$

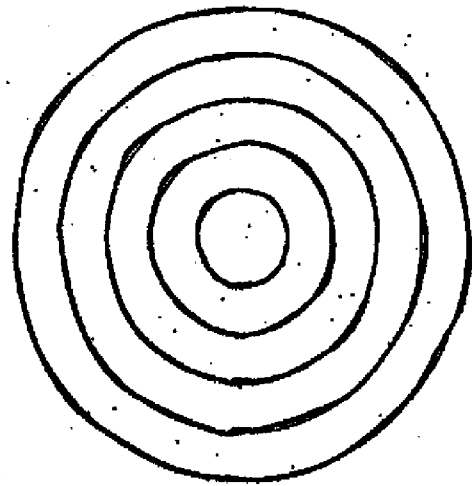


Fig. 12 実験結果(3)—加速度生成型,  $m = 10$ ,  $d = 50$

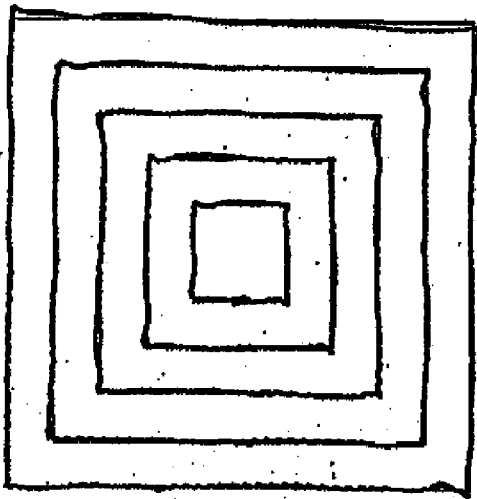


Fig. 11 実験結果(2)—速度生成型,  $d = 50$

- 加速度生成型しているとき, 四角形の角をなぞるときにうまく曲がれずに行き過ぎてしまうことが多かった。一方, 速度生成型るときはその現象はあまり見られなかった。

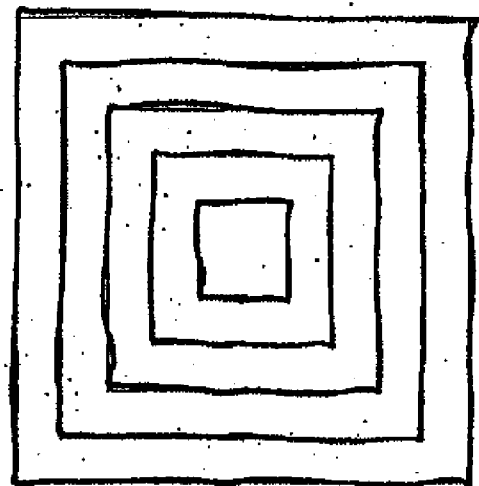


Fig. 13 実験結果(4)—加速度生成型,  $m = 10$ ,  $d = 50$

力の影響をそのまま受けるため, 摩擦力や人間が加える力の変化に敏感で, それが原因で横揺れが頻繁に起こり, 動作がスムーズでなくなり, 操作が難しくなる。

## 5. 考察

以上の実験結果をもとに, 操作性についての考察を行う。まずはじめに, 各運動生成型についての比較を行う。速度生成型においては, マニピュレータの運動が直接外力によって影響を受ける。そのため, 操作する人が物体を止めようとした位置で操作力を加えるのを止めればほぼその位置でペンが止まった。よって四角形の頂点などをトレースする場合は操作性が良いと思われる。しかし, 外

一方, 加速度生成型では, 直線などの単調な線の追従においては, 外力の揺れを仮想質量の部分である程度吸収するので, ダンピング制御に比べてロボットの動作が安定し, きれいに追従させることができたと思われる。しかし, 慣性力が働くため微小動作は速度生成型に比べて難しい。四角形の頂点などで曲がりたい位置で曲がれずに行き過ぎてしまっているのはこのためである。

次に, パラメータの影響について考察をする。

粘性係数が大きい場合、外力に対する物体の運動の感度は小さく、物体の動作が鈍くなり、物体を快適に操作するのが比較的難しい。またこの時、物体の動作が遅いため、運動生成法が異なっても、また慣性係数の大きさが異なってもそれほど大きな操作性の違いは見られなかった。一方、粘性係数が小さい場合は作業空間の粘性は比較的小さく、物体の動作が速くなり、操作しやすくなる。よって粘性係数は小さい場合のほうが協調作業に適していると考えられる。この場合、運動生成法の違いにより操作性が大きく異なってくる。前述のとおり、どちらの運動生成法においても一長一短であるといえる。微細な作業を行うときには速度生成型を、安定して作業を行うためには加速度生成型を用いるのが良いと思われる。

しかし、実際に人間が加える力は常に変化しており、また作業を行う際の摩擦の影響なども無視できない。そこで、その影響を打ち消すために、加速度生成型を用いてある程度の大きさの仮想質量を設定しておくほうが本研究で行っているような人間とロボットの協調作業においては望ましいと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、人間とロボットによる物体の協調ハンドリング問題を考え、協調作業に適した運動生成法について、実験を行い比較検討した。その結果、加速度生成型を用いてある程度の仮想質量を持たせるほうがこのような人間とロボットの協調作業システムに適しているということがわかった。

## 謝辞

なお本研究は、平成8年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(08455117)の援助を受けて行なわれている研究の一部である。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) H.Kazerooni, "Human Machine Interaction via the Transfer of Power and Information Signals" *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1632-1642, 1989.
- 2) K.Kosuge, Y.Fujisawa, T.Fukuda, "Control of Robot Directly Maneuvered by Operator" *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 49-54, 1993.
- 3) K.Kosuge, H.Yoshida, T.Fukuda, "Dynamic Control for Robot-Human Collaboration" *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 398-401, 1993.
- 4) R.Ikeura, H.Monden, H.Inooka, "Cooperative Motion Control of a Robot and a Human" *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 112-117, 1994.
- 5) O.M.Al-Jarrah, Y.F.Zheng, "Arm Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control" *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 895-900, 1997.
- 6) O.M.Al-Jarrah, Y.F.Zheng, "Arm Manipulator Coordination for Load Sharing Using Reflexive Motion Control" *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2326-2331, 1997.
- 7) K.Kosuge, H.Yoshida, D.Taguchi, T.Fukuda, "Robot-Human Collaboration for New Robotic Applications" *Proceedings of IEEE IECON*, pp. 713-718, 1994.
- 8) 小菅, 古田, 横山 "ロボットの仮想内部モデル追従制御系, メカニカルインピーダンス制御

- への応用” 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.1, pp. 55-62, 1988.
- 9) J.K.Salisbuly, “Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates” *Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- 10) D.E.Whitney, “Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions” *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, June 1977, pp. 91-97, 1977.
- 11) N.Hogan, “Impedance Control Part 1-Part 3” *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.107, pp. 1-24, 1985.
- 12) 小菅, “力制御法の分類と制御システム的设计法”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.751-758, 1991.
- 13) 小菅, 風村, “人と協調して作業をするロボットのTask-Oriented制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演会講演論文集, pp599-600, 1997.