作業対象の動特性変化を認識しやすくする 人間－機械協調制御系の設計法

非会員 稲 葉 毅 (東京工業大学)

非会員 林 崎 昌 弘 (東京工業大学)

正 員 松 尾 芳 樹 (東京工業大学)

A Design Method of a Human-machine Cooperative Control System to Ease Recognition of Work Dynamics Variation

Takeshi INABA, Non-member, Masahiro HAYASHIZAKI, Non-member, Yoshiki MATSUO, Member
(Tokyo Institute of Technology)

This study deals with a human-machine cooperative control system to ease recognition of work dynamics variation to facilitate skilled work. At first, a generalized model is introduced for the human-machine cooperative control systems which comprise a human worker co-operates with a robot manipulator holding a tool. The robot manipulator is assumed to be position-controlled using two measured interaction forces, one between the human and the manipulator and the other between the manipulator and the work. Secondary, it is indicated that two typical functions of the system, the transfer function from human force to tool position and its sensitivity function to work dynamics variation, are independently specifiable. Finally, experiments are carried out on an experimental human-machine cooperative control system that is designed to emphasize the work dynamics variation. The results illustrate that the system ease the work which is difficult to accomplish for a human worker alone.

キーワード：人間－機械協調制御系，熟練作業，容易化

1. はじめに

近年，製造業における現場技能作業者の高齢化と若い人材の不足は熟練技能の次世代への継承を阻害し，結果的に熟練作業者の不足や消失による製造業への影響が危惧されている。このような状況の中，熟練技能の解明と機械化についての研究開発が増加している⁽¹⁾。機械化のアプローチとしては単独機械による完全自動化と人間－機械協調制御系による実現が考えられる。現在熟練技能をロボットで自動化する前者の研究が多く見られるが，後者は作業状況や目的の変化への適応といった人間の能力と頑健性に代表される機械の特質とを効果的に融合するシステムとして今後期待されている。

熟練作業に課せられる要件を機械加工を例に考えると，工具など手先を思い通り正確に移動させることと，作業対象の状況や作業の進み具合などを作業中の手応えや対象からの反力といった情報から察知して適宜作業に反映させていくことの二点が挙げられる。よってこれら二つの点に着目して人間－機械協調制御系を設計すれば熟練作業といっ

た難しい作業を容易化することが可能と考えられる。これまでの人間－機械協調制御系に関する研究では，その代表例であるパワーアシストシステムに関する研究が基本的に重量物の運搬といった作業を想定しているため，前者の手先を思い通り正確に移動させることが主に注目されてきた。例えば Kazerooni らや小菅らの研究^{(2)~(4)}では，人間－機械協調制御系全体の安定性を確保しながら人間の操作力から対象への作用力までの伝達特性を指定するような設計法について論じられ，文献(5)および(6)では，その伝達特性と操作性の関係について論じられている。これらに対し筆者らは，このような人間－機械協調制御系における人間の手先位置制御に関して人間が機械側の機械力学的特性に応じて自身の機械力学的特性を適応的に変化させる性質を新たにモデル化し，手先位置制御性能だけでなく操作感においても望ましい機械側特性の設計法について検討している⁽⁷⁾。

そこで本研究ではさらに，操作力から手先位置や作用力までの伝達特性だけでなく作業対象側の特性変化や外力の作業への伝わりかたに着目した熟練作業を容易にする人

図1 人間－機械協調制御系の構成
Fig. 1. Human-machine cooperative control system.

人間－機械協調制御系について検討する。まず、本研究で取り扱う人間－機械協調制御系の構成を示しマニピュレータ制御系をブロック線図で表現する。次に、作業を容易化する際に着目する二つの特性について解析し、それらを独立に設定する補償器設計について述べる。最後に、作業者単独では認識が難しい微小な対象変化を人間－機械協調制御系により増幅して作業者に伝えることで作業が容易化できる実験例を示す。

2. 人間－機械協調制御系の構成とブロック線図

この章では本研究で対象とする人間－機械協調制御系の構成を示し、解析・設計に用いる簡略化したブロック線図を導出する。

〈2・1〉 人間－機械協調制御系の構成 図1に本研究で考える人間－機械協調制御系の構成を示す。人間と作業対象の間にロボットマニピュレータが入った構成としている。人間はマニピュレータを介して対象に手先力 f_H [N] を加え、手先位置 x [m] を制御することで作業を行う。対象物の切削加工や表面処理といった作業を想定しているが、本研究では作業の深さ方向だけに注目した一次元モデルで考えている。マニピュレータは手先力 f_h およびマニピュレータと対象間の力 f_e [N] という2つの力計測値をもとに位置制御されるものとする。

〈2・2〉 人間－機械協調マニピュレータ制御系のブロック線図 図2に人間－機械協調制御系のうち作業者から見た部分、すなわちマニピュレータ制御系のブロック線図を示す。マニピュレータはあらかじめ補償器 $R_C(s)$ による位置決め制御ループが組まれているものとする。ここで $R_x(s)$ はマニピュレータ自身の機械的力学特性である。マニピュレータの位置目標値 r [m] は手先力側補償器 $C_H(s)$ と対象力側補償器 $C_E(s)$ の2つから生成される。作業対象は対象力 f_e に対するコンプライアンス特性 $P(s)$ として表している。また、作業対象に加わる外力を f_d [N] としている。

ここで、マニピュレータの位置制御ループが考えている人間－機械協調作業の範囲内において十分高精度でかつ安

図2 人間－機械協調マニピュレータ制御系のブロック線図
Fig. 2. Block diagram of manipulator control system for human-machine cooperation.

図3 人間－機械協調マニピュレータ制御系の簡略化したブロック線図
Fig. 3. Simplified block diagram of manipulator control system for human-machine cooperation.

定性が保たれていると考える。すなわち、対象の特性や人間の手先力にかかわらず、位置目標 r から手先位置 x までの伝達特性がある固定の安定な伝達関数 $R(s)$ として実現されているものとする。このマニピュレータ位置制御特性 $R(s)$ は一般に人間－機械協調作業を考える制御帯域では1に近いと考えられる。なお、このようにあらかじめ十分な安定性と精度が実現されている制御系に補償器を付加する形で人間－機械協調制御系を構成することは、既製のロボットマニピュレータが利用できるだけでなく、人間－機械協調制御系として重要な安全性の確保の点でも有用と考える。

以上より、図2のブロック線図は図3のように簡略化される。

3. 人間－機械協調制御系の諸特性と補償器設計

この章では前章で示した人間－機械協調マニピュレータ制御系のブロック線図に基づき、安定化補償器の一般解を用いて補償器の一般形を示す。さらに、注目すべき制御系の諸特性について考察し、補償器設計の手順を述べる。

〈3・1〉 安定化補償器の一般解に基づく補償器の表現
図3のブロック線図から対象力側補償器 $C_E(s)$ はフィードバックループを安定化するように設計されなければならない。さらに、次節で述べるような人間-機械協調制御系の諸特性を望ましく整形するように設計される必要もある。そこで、安定化補償器と実現可能な諸特性のクラスを明確に記述することのできる安定化補償器の一般解⁽⁹⁾を用いて対象力側補償器 $C_E(s)$ を表現することを考える。

前章で述べたように、既存のマニピュレータの位置決め制御系が安定であると考えられるため、位置目標 r から位置決め制御系の内部状態量である f_e までの伝達特性 $R(s)/P(s)$ も安定となるはずである。よって、伝達特性 $R(s)/P(s)$ を対象力側補償器 $C_E(s)$ の制御対象と考えれば、安定な制御対象に対する安定化補償器の一般解を用いて対象力側補償器 $C_E(s)$ を表すことができる。以上より、対象力側補償器 $C_E(s)$ は安定でプロパーな伝達関数パラメータ $Q(s)$ を用いて次式のように表される。ここで、 $P_0(s)$ は作業対象伝達特性のノミナルモデルである。

$$C_E(s) = \frac{Q(s)}{1 - \frac{R(s)}{P_0(s)}Q(s)} \dots\dots\dots (1)$$

パラメータ $Q(s)$ を次節で述べるような諸特性を考慮して決定することで対象力側補償器 $C_E(s)$ を設計する。

〈3・2〉 注目すべき人間-機械協調制御系の諸特性 1章で述べたようにこれまでの人間-機械協調制御系の研究は主に重量物の運搬を目的とし、そのため静的な力の増幅率に注目している研究が多かった。それらに対し本研究では、人間単独では(力の大きさだけの問題だけでなく熟練を要するといった)難しい作業を機械と協調することで容易にすることを目的としている。切削加工など対象物に力を加えながら工具の位置を制御する作業において、その難しさは次の2点に代表されると考える。

- (a) 作業に大きな力を要するような非常に硬い対象であったり、逆に柔らかすぎて手先位置が定まりにくいような対象であっても確実に望みの手先位置を達成する必要がある。
- (b) 作業の達成具合や状況変化などを対象からの反力や手ごたえといった情報として敏感に察知しながら適切に作業をすすめていく必要がある。

これらの難しさを軽減して作業を容易化するために、本研究では人間-機械協調制御系として次のことが必要であると考えられる。

- (A) 力の増幅率だけでなく、人間-機械-対象物が連結した際の人間から見た動特性を人間が作業しやすく感じるように指定する。
- (B) 対象物の特性変化や対象物に加わる外力が効果的に人間へ伝わるようにする。

上記2つの項目を達成するために本研究では次の2つの特性に注目する。

〈3・2・1〉 体感作業特性 (A)は人間-機械協調制御系において、手先力 f_h から手先位置 x までの作業者から見た伝達特性を指定することに相当する。この伝達特性を体感作業特性 $G(s)$ と呼ぶことにする。図3および式(1)から、体感作業特性のノミナル特性 $G_0(s)$ は次式で表される。

$$G_0(s) = \frac{P_0(s)R(s)C_H(s)}{P_0(s) + R(s)C_E(s)} \\ = R(s) \left(1 - \frac{R(s)}{P_0(s)}Q(s) \right) C_H(s) \dots\dots (2)$$

著者のこれまでの研究⁽⁷⁾から、人間の手先位置制御のしやすさはこの体感作業特性に大きく依存することと、体感作業特性として望ましい伝達特性の特徴が明らかになっている。これら研究成果に基づいて適切に補償器 $C_H(s)$ および $C_E(s)$ を設計することで(2)式で表される体感作業特性を整形することができる。

〈3・2・2〉 作業対象特性変化に対する感度関数 (B)は作業対象変化に対する体感作業特性変化の比率(すなわち、感度関数)を指定することと、外力から手先位置までの伝達特性を指定することに相当する。

まず作業対象変化に対する感度関数 $S(s)$ について考える。作業対象特性の変化を次式のように作業対象変化率 $\Delta_P(s)$ を用いて乗法的なものとして表すことにする。

$$P(s) = P_0(s)(1 + \Delta_P(s)) \dots\dots\dots (3)$$

この対象変化にともなって体感作業特性 $G(s)$ が次式のように乗法的变化をすると考える。

$$G(s) = G_0(s)(1 + \Delta_G(s)) \dots\dots\dots (4)$$

この時、 $\Delta_G(s)$ と $\Delta_P(s)$ の比率すなわち感度関数は(2)~(4)式より次式のようにパラメータ $Q(s)$ を用いて表される。

$$S(s) = \frac{\Delta_G(s)}{\Delta_P(s)} \\ = \frac{R(s)}{P_0(s)}Q(s) \dots\dots\dots (5)$$

人間-機械協調制御系において、作業者は作業対象の変化を体感作業特性の変化率 $\Delta_G(s)$ として感じるようになる。(5)式から補償器 $C_E(s)$ の設計パラメータ $Q(s)$ により感度関数 $S(s)$ を適切に設定することで、作業対象変化率 $\Delta_P(s)$ を必要に応じて拡大・縮小等させて作業者に伝えることが可能であることがわかる。また、(2)式から体感作業特性 $G(s)$ はもう一つの補償器 $C_H(s)$ によりこの感度関数 $S(s)$ とは独立して整形できることに注意したい。なお、感度関数 $S(s)$ は $G(s)$ のロバスト安定性と関連しており、詳細は次節で述べる。

次に、外力 f_d から手先位置 x までの伝達特性 $G_f(s)$ を考える。図3より、そのノミナル特性 $G_{f0}(s)$ は(6)式となる。

図4 作業対象変化を明示した人間－機械協調マニピュレータ制御系のブロック線図

Fig. 4. Block diagram of manipulator control system for human-machine cooperation specifying work dynamics variation.

$$G_{f0}(s) = \frac{P_0(s) R(s) C_E(s)}{P_0(s) + R(s) C_E(s)} = R(s) Q(s) \dots\dots\dots (6)$$

このように外力からの伝達特性 $G_{f0}(s)$ もパラメータ $Q(s)$ によって整形できるが、(5) 式と (6) 式を比較すると感度関数 $S(s)$ と $G_{f0}(s)$ とは独立に整形することはできないことがわかる。ただし、想定する作業内容や外乱の性質等に応じて適切に周波数帯域を分けて整形することは可能である。このような外力からの伝達特性に関する検討は今後の課題とし、本論文では特に感度関数 $S(s)$ の整形に注目して検討する。

〈3・3〉 ロバスト安定条件と感度関数の関係 図3からわかるように作業対象特性 $P(s)$ はマニピュレータ制御系の閉ループ内に含まれるためその変化によってはマニピュレータ制御系が不安定になる可能性がある。ここではマニピュレータ制御系の安定性が保たれる条件、すなわちロバスト安定条件について考える。なお、既存のマニピュレータ位置制御系は十分にロバスト安定であると仮定し、また、その位置制御特性 $R(s)$ は作業対象変化の影響を受けないものとする。

作業対象特性 $P(s)$ の変動を (3) 式で示したように乗法的と考えると、図4のようにブロック線図で表される。

ロバスト安定性を考えるため、図4の閉ループ部分を作業対象変化率 $\Delta P(s)$ とそれ以外の要素とに分離し、図5のように等価変換する。ここで伝達関数 $M(s)$ は (7) 式で表される。

$$M(s) = -\frac{P_0(s)}{P_0(s) + R(s) C_E(s)} = -(1 - S(s)) \dots\dots\dots (7)$$

図5および (7) 式より、マニピュレータ制御系がロバスト安定となる十分条件は (8) 式となる。

$$|\Delta P(j\omega)| \cdot |M(j\omega)| = |\Delta P(j\omega)| \cdot |1 - S(j\omega)| < 1, \forall \omega > 0 \dots\dots (8)$$

図5 ロバスト安定条件導出のための等価変換
Fig. 5. Equivalent block diagram for robust stability condition.

(8) 式から、非操作時のロバスト安定性を確保するとき作業対象変化率 $\Delta P(s)$ の大きさによって感度関数 $S(s)$ に制限が加わることがわかる。すなわち、見込まれる作業対象変化率 $\Delta P(s)$ に対して (8) 式が成り立つよう注意してフィードバック補償器 $C_E(s)$ を設計する必要がある。

前節で述べた通り、作業を容易にするために作業対象特性の変化を作業者が感じやすい大きさにして伝達することが本研究の要点である。そこでロバスト安定条件のもと、感度関数 $S(s)$ の取りうる大きさの範囲を確認する。

まず、作業対象変化率 $\Delta P(s)$ の大きさがごく小さい場合を考える。(8) 式から得られる不等式、

$$|1 - S(j\omega)| < \frac{1}{|\Delta P(j\omega)|}, \forall \omega > 0 \dots\dots\dots (9)$$

から、 $|\Delta P(s)| \ll 1$ の場合感度関数 $S(s)$ を1より十分大きくできることがわかる。この時ロバスト安定の十分条件はほぼ (10) 式となり、体感作業特性の変化率 $\Delta G(s)$ の大きさは1を上限として任意に設定できることがわかる。このことは作業対象の微小な変化を体感作業特性 $G(s)$ のノミナル特性 $G_0(s)$ に対する0～2倍の変化にまで拡大して作業者に伝えることが可能であることを示しており、ロバスト安定性を維持しながら十分な大きさの感度関数 $S(s)$ を実現できることを意味している。

$$|S(j\omega)| \cdot |\Delta P(j\omega)| = |\Delta G(j\omega)| < 1, \forall \omega > 0 \dots\dots (10)$$

次に作業対象変化率 $\Delta P(s)$ の大きさが比較的大きい場合を考える。この時ロバスト安定であるためには (9) 式から感度関数 $S(s)$ が1に近い必要があることがわかる。(5) 式からこのことは体感作業特性の変化率 $\Delta G(s)$ が作業対象変化率 $\Delta P(s)$ と等しくなることを意味する。

以上より、作業対象変化率 $\Delta P(s)$ が小さい場合はそれを十分なだけ増幅して作業者に伝えることが可能であり、また、作業対象変化率 $\Delta P(s)$ が大きい場合はそれをそのまま体感作業特性の変化として伝達し認識させることができたことがわかった。

〈3・4〉 補償器の設計手順

〈3・4・1〉 補償器 $C_E(s)$ の設計 〈3・2・2〉項で述べた関係に基づき感度関数 $S(s)$ が望ましい特性を持つようパラメータ $Q(s)$ を決定する。この際に前節で考察したロバスト安定性を満たすように注意する。

感度関数 $S(s)$ として望ましい特性を安定でプロパーな伝達関数 $S_d(s)$ とおき、感度関数 $S(s)$ が次式となるよう

にパラメータ $Q(s)$ を定めることを考える。

$$S(s) = R(s) S_d(s) \quad \dots\dots\dots (11)$$

〈2・2〉節で述べた通り、一般に制御帯域内においては、位置制御特性 $R(s)$ は十分 1 に近いと考えてよい。感度関数 $S(s)$ はほぼ $S_d(s)$ に等しくなる。(5) 式と (11) 式から、パラメータ $Q(s)$ を次式とすればよいことがわかる。

$$\begin{aligned} Q(s) &= P_0(s) \frac{S(s)}{R(s)} \\ &= P_0(s) S_d(s) \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで、(11) 式のように感度関数 $S(s)$ にマニピュレータの位置制御特性 $R(s)$ を含めたことにより $Q(s)$ が簡潔になり結果的に補償器 $C_E(s)$ の次数を抑えることに注意したい。さらに、 $Q(s)$ が安定でプロパーである必要があるため、 $S_d(s)$ には $P_0(s)$ に応じた適切な相対次数を持つことと、 $P_0(s)$ に不安定極がもしあればそれを零点として持つことの 2 点が要求されることに注意する。また、(8) 式に基づいたロバスト安定性の確認も必要である。

以上より得られた $Q(s)$ と (1) 式から、補償器 $C_E(s)$ は次式となる。

$$C_E(s) = \frac{P_0(s) S_d(s)}{1 - R(s) S_d(s)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

〈3・4・2〉 補償器 $C_H(s)$ の設計 (2) 式に基づき、体感作業特性 $G_0(s)$ を望ましく整形するように補償器 $C_H(s)$ を設計する。ここでは $G_0(s)$ の望ましい特性として $G_d(s)$ を考え、(11) 式と同様、次式のようにマニピュレータの位置制御特性 $R(s)$ を乗じたものが $G_0(s)$ となるように設計する。

$$G_0(s) = R(s) G_d(s) \quad \dots\dots\dots (14)$$

上述の補償器 $C_E(s)$ の設計時と同様に $R(s)$ を $G_0(s)$ に含めることで結果的に補償器 $C_H(s)$ の次数を抑えている。(2), (13), (14) 式から、補償器 $C_H(s)$ は次式のように求められる。

$$C_H(s) = \frac{G_d(s)}{1 - R(s) S_d(s)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

4. 実 験

この章ではこれまで述べた人間－機械協調制御系設計の有効性を確認するために行った実験について述べる。

〈4・1〉 実験装置の構成と基礎特性

〈4・1・1〉 実験装置の構成 図 6 に実験装置の構成を示す。汎用ロボットマニピュレータ（三菱電機製 RV-E4N）で作業対象の動特性と協調作業するマニピュレータの両方を実現している。すなわち、今回は実作業対象を用いない人間－機械協調作業シミュレータを構成し実験を行った。実験装置において、作業対象と補償器の動特性を実装したパーソナルコンピュータ（CPU: PentiumII 300[MHz]）は、力センサで検出された作業者の手先力 f_h に基づいて算出される位置指令値 r をロボットマニピュレータのコントローラに 14.2 [ms] の周期で与えている。

図 6 実験装置の構成

Fig. 6. Schematic diagram of the experimental setup.

〈4・1・2〉 マニピュレータの位置制御特性 $R(s)$ の測定

まず、補償器の設計に必要となるマニピュレータ位置制御特性 $R(s)$ をマニピュレータ単体での周波数応答から測定した。その結果、マニピュレータの位置指令周期と同じ 14.2[ms] のむだ時間とみることができていることが分かった。そこで $R(s)$ はむだ時間を Pade 近似した次式とする。

$$R(s) = \frac{1 - 0.0142s/2}{1 + 0.0142s/2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

〈4・1・3〉 作業対象の動特性モデル 作業対象の動特性モデルとして、基本的な機械システムであるバネ・マス・ダンパ系を考える。作業対象のノミナルモデル $P_0(s)$ および変化を含んだ作業対象特性 $P(s)$ ををそれぞれ次式で与える。

$$\begin{cases} P_0(s) = \frac{1}{M_0s^2 + C_0s + K_0} \\ P(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (17)$$

〈4・2〉 補償器の設計 まず作業対象特性の変化に対する感度関数 $S(s)$ を適切に整形することを考える。〈3・4・1〉項で述べたように、感度関数として望ましい特性を伝達関数 $S_d(s)$ として指定すればよい。本論文における実験では $S_d(s)$ を (18) 式で表されるカットオフ周波数 50[rad/s]、定常ゲインが 5 の 2 次のバターワースフィルタと設定した。この時、人間の手先位置制御の動作周波数帯域⁽⁷⁾ が十分含まれると考えられる 50[rad/s] 以下の帯域において、作業対象の特性変化が 5 倍に増幅されて作業者に伝わることになる。なお、次節で示す通り実験の際に想定した作業特性変化に対してロバスト安定であることは確認できる。

$$S_d(s) = \frac{5 \cdot 50^2}{s^2 + 2 \cdot 0.707 \cdot 50s + 50^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

次に、人間の手先力から手先位置までの伝達特性である体感作業特性 $G_0(s)$ について考える。〈3・2・1〉項で述べたように、体感作業特性は人間が手先位置制御しやすいような伝達特性が望まれ、〈3・4・2〉項で示したように望ましい

伝達特性 $G_d(s)$ に整形することが可能である。著者らの過去の検討結果⁽⁷⁾ から体感作業特性としては適当なゲインを持つ過減衰な 2 次系が望ましいことが分かっている。したがって、 $G_d(s)$ をそのような特性を持つ伝達関数とすればよい。

ただし、次節で述べる実験では作業対象特性の変化に対する感度関数の整形による作業性の変化について特に注目するため、体感作業特性は特別に整形しない設定とする。すなわち、あらかじめ作業対象特性のノミナルモデル $P_0(s)$ として体感作業特性に望まれる 2 次系の特性を持たせておき、(19) 式のように $G_d(s)$ としては $P_0(s)$ そのものを用いることにした。

$$G_d(s) = P_0(s) \dots\dots\dots (19)$$

以上のように $S_d(s)$ と $G_d(s)$ を定め、(13) 式と (15) 式に基づいて算出した補償器を用いて実験を行った。

〈4・3〉 実験

〈4・3・1〉 実験 1 (作業対象特性変化の手先力への反応)

作業者は作業対象の変化を作業中の手先力の変化から察知すると考えられる。そこで、設計した人間-機械協調制御系において、対象特性変化時の手先力変化を測定する実験を行った。作業対象特性は (20) 式に示すように手先位置 ($x = 0.1$ [m]) において対象特性の粘性項が 20% 変化するように設定した。

$$P(s) = \begin{cases} \frac{1}{M_0 s^2 + C_0 s + K_0} & (x \leq 0.1) \\ \frac{1}{M s^2 + C s + K} & (x > 0.1) \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

$$\begin{cases} M_0 = 10 \text{ [kg]} & M = 10 \text{ [kg]} \\ C_0 = 100 \text{ [Ns/m]} & C = 120 \text{ [Ns/m]} \\ K_0 = 1 \text{ [N/m]} & K = 1 \text{ [N/m]} \end{cases}$$

(20) 式のような作業対象変化に対してシステムがロバスト安定であることを確認するために (8) 式の左辺をプロットしたものが図 7 である。この図から、安定条件が満たされていることがわかる。

実験は被験者にはば一定の速度で手先位置を移動させるよう指示して行った。その際の手先位置 x と手先力 f_h の測定結果が図 8 である。(a) は作業単独で作業を行った場合、(b) は前節のとおり設計した人間-機械協調制御系での作業である。作業単独に比べて人間-機械協調制御系のほうは破線で示した特性変化点の前後で手先力 f_h が大きく変化しており、実際、被験者は対象特性の変化が明確に感じ取れるようになった。

〈4・3・2〉 実験 2 (移動する作業対象特性変化点への追従作業)

次に、典型的な機械加工作業の例として、作業対象の性質 (材質など) が変化する境界面をトレースするような作業を考える。具体的には表面仕上げ作業などが相当する。対象変化点は時間関数 $x_r(t)$ で表されるとし、作業対象特性は (21) 式で表されるものとする。すなわち、

図 7 ロバスト安定条件の確認 (実験 1)

Fig. 7. Test for robust stability condition (Exp. 1).

$x_r(t)$ で表される位置を境に弾性項が 20% 変化するように設定した。

実験 1 と同様にロバスト安定条件 (8) 式左辺のプロット (図 9) からロバスト安定性は確認できる。

$$P(s) = \begin{cases} \frac{1}{M_0 s^2 + C_0 s + K_0} & (x \leq x_r(t)) \\ \frac{1}{M s^2 + C s + K} & (x > x_r(t)) \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

$$\begin{cases} M_0 = 10 \text{ [kg]} & M = 10 \text{ [kg]} \\ C_0 = 100 \text{ [Ns/m]} & C = 100 \text{ [Ns/m]} \\ K_0 = 20 \text{ [N/m]} & K = 24 \text{ [N/m]} \end{cases}$$

対象特性が変化が感じられる手先位置を探りながら追従するよう被験者に指示して実験を行った。図 10 に実験結果を示す。図中、実線が作業者の手先位置 x 、破線が特性変化点 $x_r(t)$ である。図 10(a) の作業単独の場合は特性変化点を全く認識できず、特性変化点に追従することは不可能であった。しかし、図 10(b) の人間-機械協調制御系では変化点を認識することができるようになり、よく追従できている。なお、図 10(b) の時刻 20[s] から数秒間手先位置が特性変化点に追従できていない期間があるが、これは想定した作業対象特性の変化が 2 値的であるため、一旦手先位置が特性変化点から大きく外れその方向を見失うと特性変化点への復帰が難しくなるためである。このような対象の特性変化の性質に応じて、設計時に指定する感度関数の特性を望ましく選定すればより作業を行いやすくすることが可能と考えられる。作業内容に応じた感度関数の整形については今後の検討課題としたい。

5. おわりに

本論文では作業を容易にする人間-機械協調制御系について作業対象の特性変化の作業者への伝わり方に注目して検討した。

まず、人間-機械協調制御系の構成を示し、作業の行い

(a) 作業者単独の場合

(b) 人間-機械協調制御系の場合

図 8 実験結果 1 (作業対象特性変化の手先力への反応)

Fig. 8. Experimental results 1 (Influence of work dynamics variation to hand force).

やすさを考える上で重要な 2 つの特性，すなわち体感作業特性と作業対象変化に対する感度関数に着目して考察した。その結果，2 つの補償器を適切に設計することでロバスト安定性を損なわずにそれらの特性が独立に設定できることを示した。さらに，作業対象変化を増幅して作業者に伝達するように設計した人間-機械協調制御系で作業を容易にすることが可能であることを実験結果から示した。

今後の課題としては，実作業への適用とその作業内容に応じた感度関数の適切な整形指針について検討することがあげられる。

最後に，本研究は平成 10 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 (C)，課題番号 11650442）を受けており，こ

図 9 ロバスト安定条件の確認（実験 2）

Fig. 9. Test for robust stability condition (Exp. 2).

(a) 作業者単独の場合

(b) 人間-機械協調制御系の場合

図 10 実験結果 2 (移動する作業対象特性変化点への追従)

Fig. 10. Experimental results 2 (Tracking to varying work dynamics variation point).

に記して謝意を表す。

（平成 12 年 01 月 25 日受付）

文 献

- (1) "特集 熟練技能の解明とその機械化", 計測と制御, Vol. 37, No.

- 7, (1998)
- (2) H. Kazerooni, et al : "Dynamics and Control of Robotic Systems Worn by Humans", J. of DSMC, Vol. 113, 379-387 (1991)
 - (3) 小菅一弘ら:"仮想ツールダイナミックスに基づくマン・マシン系の制御", 日本機械学会論文集 (C 編), 60, 572, 1337/1343 (1994)
 - (4) 藤澤佳生ら:"マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究 (第 4 報, マン・ロボット協調作業による油圧マニピュレータの制御と評価実験)", 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.115-C, No.10, 1115/1120 (1995)
 - (5) Ryojun Ikeura, et al : "Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human", Proc. of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3097/3102 (1995)
 - (6) 林原靖男ら:"パワーアシスト装置におけるアシスト比の操作感に基づく評価", 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.117-C, No.5, 534/539 (1997)
 - (7) 稲葉毅ら:"人間-機械制御系における手先運動制御に関する人間の開ループ整形特性", 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol. 119-C, No. 2, 269/275 (1999)
 - (8) John C. Dyle, et al FEEDBACK CONTROL THEORY, New York, NY : Macmillan Publishing Company (1992)

稲 葉 毅 (非会員) 1991 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程終了。92 年東京工業大学工学部助手。現在同大学院理工学研究科機械制御システム専攻助手。人間-機械制御系, アクチュエータ系のロバスト制御に関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本人間工学会会員。

林 崎 昌 弘 (非会員) 1999 年東京工業大学工学部制御システム工学科卒業。現在, 同大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程在学中。人間-機械協調系に関する研究に従事。計測自動制御学会会員。

松 尾 芳 樹 (正員) 1984 年東京工業大学大学院博士課程制御工学専攻修了 (工学博士)。同年同大学工学部助手, 1990 年同助教授, 現在同大学院理工学研究科機械制御システム専攻助教授。メカトロニクスシステムの制御, 人間-機械制御系に関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本人間工学会, 日本シミュレーション学会会員。