

人間-ロボット系の追従制御特性

辻 敏夫*¹ 加藤 莊志*² 金子 真*¹

Tracking Control Properties of Human-robot Systems

Toshio Tsuji*¹, Takashi Kato*² and Makoto Kaneko*¹

Human-robot systems including interaction between human operators and robots should be designed with careful consideration for dynamic property and control ability of the human operator. In this paper, tracking tests of the human-robot system using an impedance-controlled robot are performed in order to clarify the control ability of human operators, and changes of the tracking ability and the dynamic property of the human operator are analyzed for different values of the robot impedance. From the experimental results, it is shown that the human operator tries to keep the dynamic property of the overall system as constant as possible by adjusting his or her own impedance property.

Key Words: Human-robot Systems, Impedance Control, Tracking Test, Man-machine Systems

1. はじめに

最近のロボット機器の高性能化に伴い、工場などの特殊な環境下で行う作業に限らず、病人や高齢者の看護・介助、家庭やオフィスのような日常生活での人間の補助などを目的としたロボットシステムの開発が期待されている。このような人間とロボットの相互作用を含むシステムでは、人間が制御や管理といった作業の主導権を有し、ロボットが人間を補助するという形態をとる場合が多い。したがって人間-ロボット系を設計する際には、作業をより正確、迅速に遂行できるだけでなく作業者の負担を軽減することや作業者に違和感を与えないこと、作業性能が作業者の熟練度にあまり影響されないことなどの点に注意する必要がある。

すでにロボット工学の分野においては人間とロボットからなるシステムの設計・制御法についての研究が盛んに行われている。このようなシステムを考えるととき人間の特性をどのように扱うかが一つのポイントとなるが、従来からインピーダンス特性を用いて人間の制御特性をモデル化する場合が多い。この方法の利点はロボットの特性もインピーダンスを用いて表現することが可能なことから、システム全体をインピーダンスで記述することができるという点にある。このようなシステム全体を

インピーダンスとして捉えた人間-ロボット系に関する研究は、大きく分けて二つのシステム形態を扱っている。

第一はパワーアシストシステムと呼ばれる人間の力を増幅して作業を行う形態である。Kazerooni [1] はそれまでマスタとスレーブの2体のロボットを用いて構成していたパワーアシストシステムを1体のロボットだけで構成する手法を提案し、その挙動の周波数応答から人間のインピーダンス特性を推定している。また横小路ら [2] [3] や Colgate [4] のようにテレオペレーション作業において人間のインピーダンス特性を考慮した研究もこの枠組みで捉えることができる。特に横小路ら [2] [3] は人間のインピーダンスモデルを用いて、テレオペレーションシステムの安定性の解析を行っている。

第二は人間とロボットが協調して作業を行う形態で、人間もロボットも作業対象物に力を加え人間の力の不足分をロボットが補うというシステムである。Kosuge ら [5] [6] は被験者にロボットを操作させ、その周波数応答から最小2乗法で人間のインピーダンスを推定した。Al-Jarrah ら [7] [8] は人間の特性を剛性のみで表現し、インピーダンスを用いてモデル化したシステムにおいて人間の剛性がシステムの安定性に重要な影響を与えることを示した。また Ikeura ら [10] は2人の人間にそれぞれマスタ役、スレーブ役を割り当て、追従実験から得られた軌道と操作力より最小2乗法を用いてスレーブ役のインピーダンス特性を推定し、このインピーダンス特性をロボットに設定することで、システムの操作性を改善できることを示している。

これらの研究では人間の特性をインピーダンスを用いてモデル化しているが、動作中の人間のインピーダンス特性が一定であると仮定しているもの [1]~[3] [5] [6] [10] と、変化するとして

原稿受付 1999年4月2日

*¹広島大学工学部

*²広島大学大学院国際協力研究科

*¹Faculty of Engineering, Hiroshima University

*²Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University

いるもの [4] [7] [8] の 2 種類に分類できる．しかしながら，後者の研究においても人間のインピーダンス特性がどのように変化するかについては詳しい議論がなされておらず，また人間が作業目的や作業対象物の特性に応じて自らのインピーダンス特性をどのように調節するかについては触れられていない．

一方，人間の腕のインピーダンス特性が姿勢 [11] [12] や筋収縮の度合い [13] ~ [15] によって変化することはよく知られている．また Hogan [16] は人間がロボットの先端を把持しているときロボットに不安定なインピーダンスを設定すると，人間がシステムの安定性を保つために自らのインピーダンス特性を変えようとすることを実験的に示した．このことは人間が作業に応じてインピーダンス特性を調節していることを意味する．また作業を繰り返すことによる学習効果は，人間のインピーダンス特性が作業の熟練度に依存して変化している可能性を強く示唆している．

人間とロボットとの自然な協調作業を実現するためには，このような人間の制御特性や制御能力を十分に考慮してシステム全体を設計する必要がある．そこで本論文では 1 自由度のリアモータを用いてインピーダンス制御されたロボットを模擬し，人間-ロボット系の追従制御実験を行う．そして，ロボットのインピーダンスパラメータや作業者である人間の上部インピーダンスに依存して，どのように人間の制御特性が変化するかを実験的に解析し，人間の制御特性に関する基礎資料を得ることを目的とする．

以下，2 では本論文で扱う人間-ロボット系の構成と実験装置について説明し，3 ではロボットインピーダンスによる人間の制御特性の変化，4 では人間の上部インピーダンス特性の影響について解析する．

2. 実験方法

2.1 人間-ロボット系の構成

Fig. 1 に本論文で対象とする人間-ロボット系の構成を示す [17]．図中， $r \in \mathcal{R}^l$ は目標軌道， $e \in \mathcal{R}^l$ は制御偏差， $f \in \mathcal{R}^l$ は手先力， $x \in \mathcal{R}^l$ はロボットの位置を表す． l は作業空間の自由度である．操作者は表示装置に表示される偏差 e をできるだけ小さくするように，ロボットに力 f を加える．ロボットはインピーダンス制御 [18] [19] されており，手先の運動方程式は

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + K(x - x^e) = f \quad (1)$$

とする．ただし $M, B, K \in \mathcal{R}^{l \times l}$ はそれぞれロボットの手先の慣性，粘性，剛性行列， $x^e \in \mathcal{R}^l$ は手先の平衡位置を表す．人間-ロボット系の制御特性は，ロボットのインピーダンスパラメータや作業者の上部の手先インピーダンス特性に大きく影響されることになる．特に作業者の腕のインピーダンス特性は姿勢や手先位置に依存して変化する [11] ~ [15] ことが知られている (Fig. 1 参照)．

本論文では，1 自由度のリアロボット ($l = 1$) を用いて人間-ロボット系を構成した (Fig. 2 参照)．このロボットは，ムービングマグネット駆動方式を採用したリアテーブル ((株) 日本トムソン製，エンコーダ分解能: $2 [\mu\text{m}]$) で，推力制御 (最大 $\pm 10 \times 9.8 [\text{N}]$) が可能である．ロボットには 6 軸力センサ

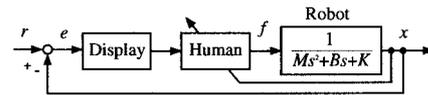


Fig. 1 Human-robot system

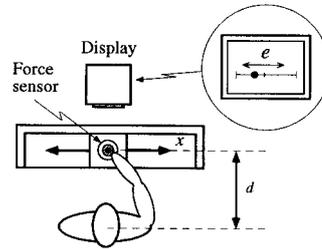


Fig. 2 Experimental apparatus

(ピーエルオートテック製，分解能: 並進力 x 軸， y 軸: $0.05 [\text{N}]$ ， z 軸: $0.15 [\text{N}]$ ，回転力: $0.003 [\text{Nm}]$) を取り付け，被験者がロボットに加える力を測定する．

実験中は被験者を椅子に座らせ，ロボットのテーブル部に取り付けたハンドル (z 軸回りの回転が可能) を把持した状態でロボットを操作するように指示する．このとき被験者は把持力の調節を随意的に行うことができる．なお，ロボット制御のサンプリング周波数は $1 [\text{kHz}]$ ，解析に用いるデータのサンプリング周波数は $25 [\text{Hz}]$ とした．

目標入力は，白色雑音を 2 次バターワースフィルタ (カットオフ周波数 $0.5 [\text{Hz}]$) で平滑化した信号で，被験者の正面に設置したオシロスコープには，偏差 e を表示した．被験者にはこの偏差をできるだけ小さくするように教示した．

2.2 実験条件

実験では，ロボットの剛性 K を $K = -55.0, -27.5, 0, 27.5, 55.0, 82.5, 110, 137.5 [\text{N/m}]$ の 8 種類，固有角周波数 ω_n を $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = 2, 4, 6, 8, 10 [\text{rad/s}]$ の 5 種類，減衰係数を $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{MK}} = -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の 8 種類とした．また被験者からハンドルまでの距離 d は $d = 0.55 [\text{m}]$ ，目標入力の最大振幅の絶対値は $0.1 [\text{m}]$ とした．なおロボットの剛性 K に関する手先の平衡位置 x^e は被験者の体の中心から前方に距離 d 離れた位置とし，この点を作業座標系の原点 ($x^e = 0$) とした (Fig. 2 参照)．

試行時間は $t_f = 60 [\text{s}]$ ，被験者は男子大学生 4 名である．なお試行間には十分な休憩をはさんでいる．

2.3 実験結果の一例

Fig. 3 に $\omega_n = 10 [\text{rad/s}]$ ， $\zeta = 1.0$ ， $K = 55.0 [\text{N/m}]$ と設定したときの実験結果の一例を示す．上から順に目標入力 r ，手先位置 x ，偏差 e ，作業方向であるテーブルの接線方向の手先力 f_x ，テーブルの法線方向の手先力 f_y である．

このときの制御特性を評価するため，次のような評価指数 J ， U を定義する．

$$J = \int_0^{t_f} e^2(t) dt / \int_0^{t_f} r^2(t) dt \quad (2)$$

$$U = U_x + U_y \quad (3)$$

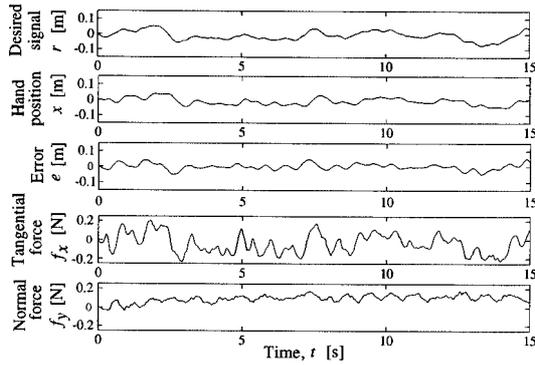


Fig. 3 An example of experimental results ($K = 55$ [N/m], $\omega_n = 10$ [rad/s], $\zeta = 1$, $d = 0.55$ [m], Subject = A)

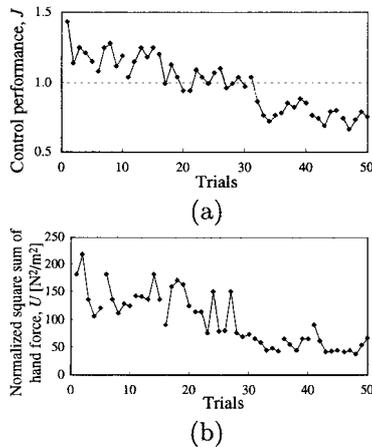


Fig. 4 Change of the control performance J and the normalized square sum of hand force U_x depending on the number of trial ($K = 55$ [N/m], $\omega_n = 6$ [rad/s], $\zeta = -0.5$, $d = 0.55$ [m], Subject = B)

$$U_x = \int_0^{t_f} f_x^2(t) dt / \int_0^{t_f} r^2(t) dt \quad (4)$$

$$U_y = \int_0^{t_f} f_y^2(t) dt / \int_0^{t_f} r^2(t) dt \quad (5)$$

J は 2 乗偏差面積, U は手先力 $f = (f_x, f_y)^T$ の 2 乗和を目標軌道の 2 乗積分値で正規化した値で, U_x, U_y はそれぞれ手先軌道の接線方向, 法線方向の成分を表す. ここで, t_f は試行時間で $t_f = 60$ [s] である.

Fig. 4 に, ある被験者の試行回数に対する J と U の変化を示す. ただし, 実験条件は $\omega_n = 6$ [rad/s], $\zeta = -0.5$, $K = 55.0$ [N/m] で, 連続する試行は実線で結んでいる. この被験者は, 安定なロボットインピーダンスに対する追従制御実験は経験しているが, $\zeta = -0.5$ という不安定なインピーダンスに対しては初めての実験である. Fig. 4 より, 20~30 試行目までは, J は 1 以上の大きい数値を示し U も大きく変動しているが, 30 試行以降では J が低下し U もかなり安定していることが分かる. すなわち, 被験者は試行を重ねるにつれて小さな操作力で高い追従特性を実現できるようになっているのである. 本論文では, ある程度人間が作業に熟練した後の制御特性

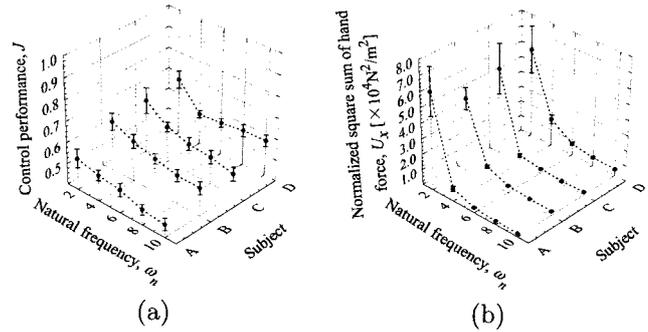


Fig. 5 Change of the control performance J and U_x depending on the natural frequency ω_n and subjects ($K = 55$ [N/m], $\zeta = 1$, $d = 0.55$ [m])

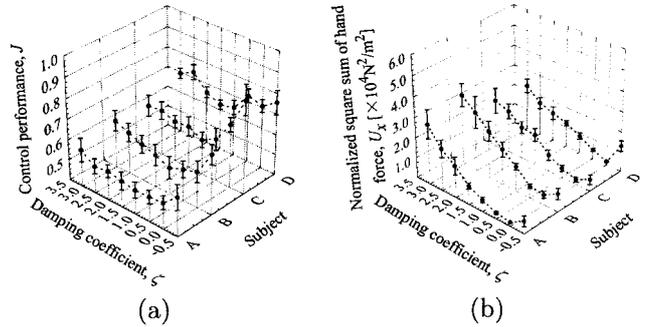


Fig. 6 Change of the control performance J and U_x depending on the damping coefficient ζ and subjects ($K = 55$ [N/m], $\omega_n = 4$ [rad/s], $d = 0.55$ [m])

を解析することにする.

3. ロボットインピーダンスによる人間の制御特性の変化

3.1 ロボットインピーダンスによる制御成績の変化

Fig. 5 に制御成績 J, U_x の変化を示す. 図は固有角周波数 ω_n による十分な試行後の 10 試行の平均と標準偏差を四人の被験者別に示したもので, 実験条件は $K = 55.0$ [N/m], $\zeta = 1.0$ である. 図からある程度の個人差は見られるものの, ロボットの固有角周波数 ω_n の減少に伴って制御成績 J が増加し, 手先力の 2 乗和 U_x も増加していることが分かる. これは ω_n が減少するにつれてロボットの慣性 M , 粘性 B が増加し, 操作に大きな力が必要となるためである.

一方, Fig. 6 に減衰係数 ζ による制御成績 J, U_x の変化を示す. 実験条件は $K = 55.0$ [N/m], $\omega_n = 4$ [rad/s] で, いずれも 10 試行の平均と標準偏差を示している. 図から, 減衰係数 ζ が増加しても J はわずかに増加するだけだが, 粘性が増加するため操作に大きな力が必要となり, U_x は大きく増加していることが分かる. またどの被験者も減衰係数 $\zeta = 1.0$ の付近で制御成績が最も良くなっている. ζ が負になるとロボットインピーダンスが不安定になるため J は増加するが, それでも 0.7~0.8 程度にとどまり, 被験者がロボットを安定化し, ある程度の追従特性を実現している. このときの実験結果の一例を Fig. 7 に示す. 図は $\zeta = -0.5$ の場合の時間波形で, 手先

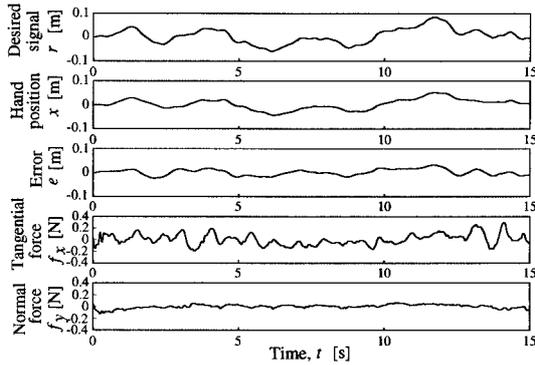


Fig. 7 An example of experimental results for an unstable robot impedance ($K = 55$ [N/m], $\omega_n = 6$ [rad/s], $\zeta = -0.5$, Subject = A)

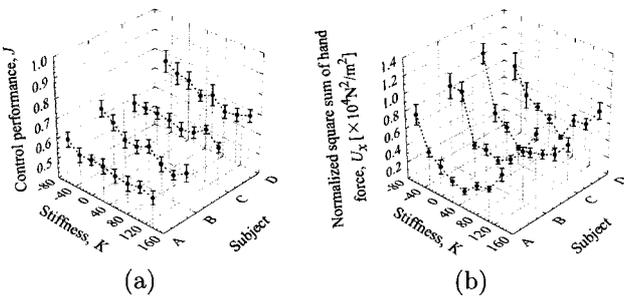


Fig. 8 Change of the control performance J and U_x depending on the stiffness K and subjects ($M = 3.43$ [kg], $\zeta = 0$)

位置 x が発散することなく目標入力 r をかなり良く追従していることが分かる。

また Fig. 8 にロボットの剛性 K による制御成績 J , U_x の変化を示す ($\zeta = 0$, $M = 3.43$ [kg]). ロボットの剛性 K が増加すると操作に大きな力が必要となるため, U_x は大きく増加する. 逆に K が負になると不安定なロボットの運動を押さえる必要が生じるため U_x は増加し, J も増加する. ただし, どの被験者も系を安定化できており, また $K = 0 \sim 137.5$ [N/m] の範囲ではかなり高い追従特性が実現されていることが分かる.

3.2 動特性解析

次に実験結果から人間-ロボット系の動特性を解析した. Fig. 1 に示したように人間の腕のインピーダンス特性は手先位置に依存して変化するが, ここでは第一次近似の意味で記述関数を推定した. 以下に示すデータは, 偏差 e からロボット位置 x までの開ループ記述関数 $G(j\omega)$, 偏差 e から手先力 f_x までの人間の記述関数 $H(j\omega)$ で, 部分空間法 [20] を用いて計算した結果である.

Fig. 9 (a) にロボットの固有角周波数 ω_n による $G(j\omega)$ の変化を示す. 図中, 実線は $\omega_n = 2$ [rad/s], 一点鎖線は $\omega_n = 4$ [rad/s], 点線は $\omega_n = 10$ [rad/s] の場合の推定結果で, いずれも 10 試行の平均である. 図から ω_n の変化にもかかわらずボード線図には大きな変化は見られないことが分かる. このときの人間の記述関数 $H(j\omega)$ を Fig. 9 (b) に示す. 図から固有角周波数が減少するにつれて, 人間のゲイン特性が高周波側であがっていることが分かる. 人間がロボットのインピー

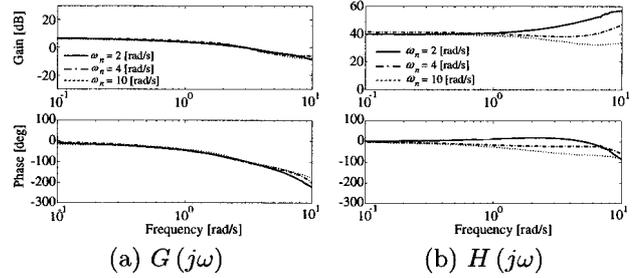


Fig. 9 Estimated describing functions with different ω_n ($K = 55$ [N/m], $\zeta = 1$, Subject = A)

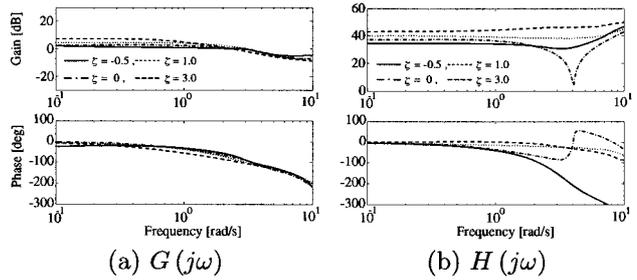


Fig. 10 Estimated describing functions with different ζ ($K = 55$ [N/m], $\omega_n = 4$ [rad/s], Subject = A)

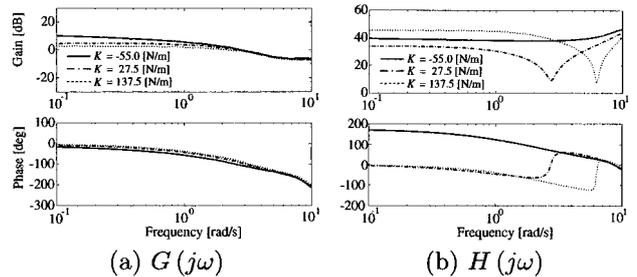


Fig. 11 Estimated describing functions with different K ($M = 3.43$ [kg], $\zeta = 0$, Subject = A)

ダンス特性の変化に応じて自らの応答特性を大きく変化させているのである.

次にロボットの減衰係数 ζ を変えた場合の $G(j\omega)$, $H(j\omega)$ を Fig. 10 (a), (b) にそれぞれ示す. 図中の実線は $\zeta = -0.5$, 一点鎖線は $\zeta = 0$, 点線は $\zeta = 1.0$, 破線は $\zeta = 3.0$ の場合の推定結果である. 減衰係数 ζ が -0.5 の場合を除き, 系全体の動特性に大きな変化は見られないが, 減衰係数 ζ が -0.5 の場合は他の条件に比べ, ゲイン特性がやや低下しており, ロボットが大きな不安定性を有している場合には人間が自らの動特性を調節しにくいことが分かる.

またロボットの剛性 K を変えた場合の $G(j\omega)$, $H(j\omega)$ を Fig. 11 (a), (b) に示す. 図中の実線は $K = -55.0$ [N/m], 一点鎖線は $K = 27.5$ [N/m], 点線は $K = 137.5$ [N/m] の場合の推定結果である. 図からロボットの剛性 K の変化に応じて人間が自らの応答特性を大きく変化させているのが分かる. ロボットの剛性が不安定なときや逆に大きなときでも, ある程度の範囲で人間が応答特性を変化させ, 系全体の制御特性を維持

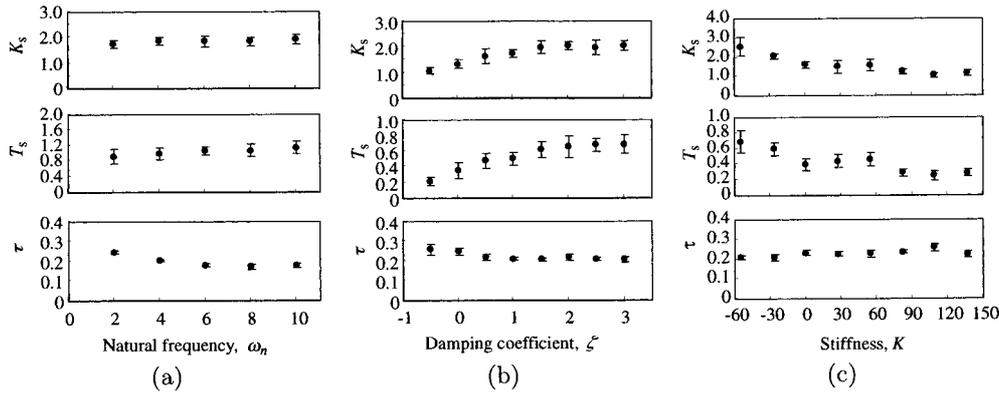


Fig. 12 Estimated Parameters of the human-robot system

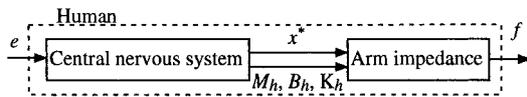


Fig. 13 Human operator model

できることが分かる．

一般にマン・マシン制御系では制御対象の特性がかなり大きく変化しても人間が自らの特性を適応的に調節し、系全体の制御特性をほぼ一定に保つことが古くから知られている [21]．本実験で取り上げた人間-ロボット系においても固有角周波数 ω_n が約 2~10 [rad/s] の範囲、減衰係数 ζ が約 0~3.0、ロボットの剛性 K が約 -55.0~137.5 [N/m] の範囲で人間の適応動作が有効に働き系全体の制御特性がほぼ一定に保たれることを確認することができた．

そこで、人間-ロボット系の制御特性をモデル化するため、部分空間法を用いて推定した記述関数に次のような伝達関数モデルをあてはめ最小 2 乗法で各パラメータを推定した．

$$\tilde{G}(s) = \frac{K_s}{1 + T_s s} e^{-\tau s} \quad (6)$$

K_s はゲイン、 T_s は時定数、 τ は人間のむだ時間を表す．推定したパラメータ K_s, T_s, τ の 10 試行の平均と標準偏差が、固有角周波数 ω_n 、減衰係数 ζ 、剛性 K によってどのように変化しているかをそれぞれ Fig. 12 (a), (b), (c) に示す．推定結果より、本論文で取り上げた実験条件の範囲内では、人間とロボットをまとめた制御特性を 1 次遅れ要素とむだ時間要素で近似できること、減衰係数が $\zeta = 1$ 以上のロボットインピーダンスに対しては $\tilde{G}(s)$ の各パラメータがほぼ一定に保たれること (Fig. 12 (a), (b) 参照) などが明らかになった．

このとき、Fig. 1 より人間の伝達特性は

$$\tilde{H}(s) = \frac{K_s(M_h s^2 + B_h s + K_h)}{1 + T_s s} e^{-\tau s} \quad (7)$$

と近似することができる．Fig. 13 に人間の伝達特性のモデルを示す．このモデルは操作者である人間の特性 (Fig. 1 参照) を中枢神経部と上肢インピーダンス部の二つの要素に分けたもので、中枢神経部から手先剛性の平衡位置 x^* および望ましい上肢インピーダンス M_h, B_h, K_h が出力され、上肢インピー

ダンス部が手先力を出力する．人間の手先インピーダンスは 2 次系であるから式 (7) の分子の位相進み要素を主に実現し、1 次遅れ要素とむだ時間要素は中枢神経部で実現される．この上肢インピーダンス調節機構の役割を明確にするため、次節では人間の上肢インピーダンスが制御結果に影響しないような条件で比較実験を行った．この場合、式 (7) の分子の位相進み要素を実現することが難しくなり、系の制御特性は低下すると予想される．

4. 人間の上肢インピーダンスによる制御特性の変化

前節の実験では被験者の腕はロボットとともに運動した．そこで次にロボットのハンドルを固定し、被験者が力を加えても動かないようにして同様の実験を行った．この実験では、被験者が加えた力から式 (1) のインピーダンス特性を計算機内でシミュレートし、計算した仮想的なロボットの位置 x と目標軌道 r との偏差 e をディスプレイに表示した．被験者にはこの偏差をできるだけ小さくするように教示した．すなわち、一般に用いられるマン-マシン制御系 [21] において、制御対象に 2 次遅れ要素を用いて追従制御実験を行ったことになる．

Fig. 14, 15 に制御成績 J, U_x の変化を示す．いずれも (a) は固有角周波数 ω_n , (b) は減衰係数 ζ , (c) は剛性 K による変化で、十分な試行後の 10 試行の平均と標準偏差を 4 人の被験者別に示している．その他の実験条件、被験者は Fig. 5, 6, 8 と同じである．Fig. 14 からいずれの実験条件でもロボットのハンドルが人間の上肢と一緒に動く場合 (Fig. 5, 6, 8) に比べて J が大きく増加している．逆に U_x は大きく減少し、人間が自らゲインを上げることができないことが分かる (Fig. 15)．特に減衰係数 ζ が負の不安定なインピーダンス特性に対しては制御不能であった (Fig. 14 (b) $\zeta = -0.5$)． $\zeta = 0$ のときも不安定にはならないものの、目標値への追従はほとんどできていない (Fig. 14 (c))．いずれの場合も、本論文で取り上げた人間-ロボット系の制御性能が通常マン-マシン制御系 [21] を大きく上回っていることが分かる．

以上の結果は、人間の上肢のインピーダンス特性が人間-ロボット系のインピーダンス特性に与える影響に起因する．人間は上肢運動において手先のインピーダンスを随意的に調節することができる [11]~[14]．したがって、被験者の腕がロボットと

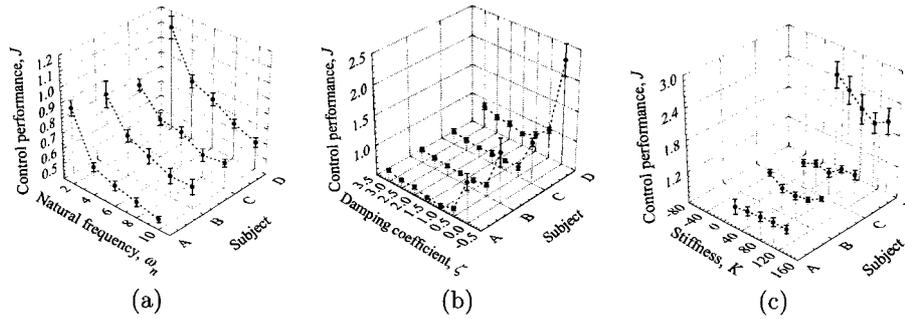


Fig. 14 Change of the control performance J in which the robot does not move

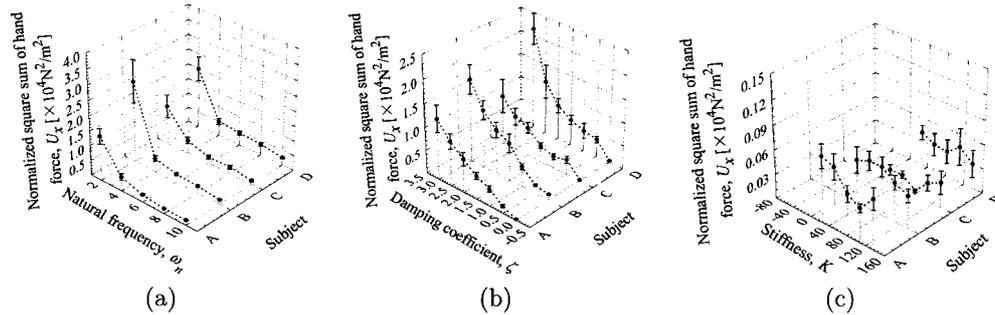


Fig. 15 Change of the control performance U_x in which the robot does not move

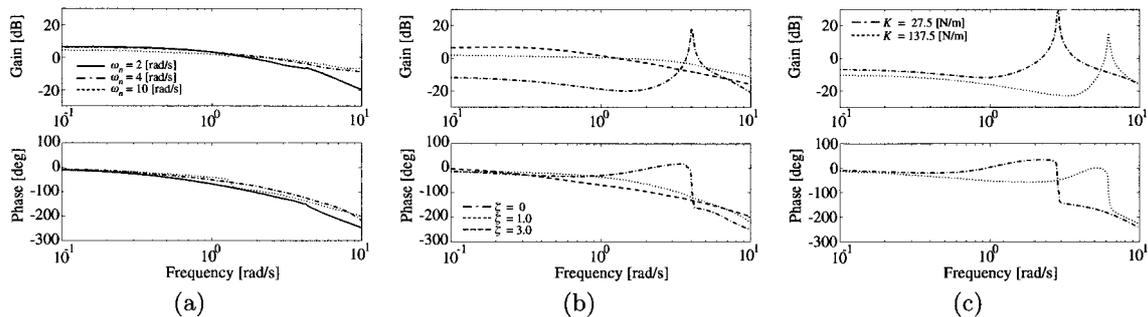


Fig. 16 Change of the dynamic properties of the human-robot system in which the robot does not move

ともに運動する前節の実験では被験者は自らの上肢インピーダンスを変えることによりロボットと腕を合わせた系全体のインピーダンスをある程度、調節することができる。ところが、ロボットハンドルが固定されるともはや上肢インピーダンスは系のインピーダンス特性に影響を与えない。人間-ロボット系ではロボットのインピーダンスだけでなく、人間の上肢インピーダンスが重要な役割を果たしており、この点が通常のマン-マシン制御系 [21] との大きな相違点である。

最後に人間-ロボット系の動特性を前節と同様に部分空間法 [20] により推定した結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 (a) はロボットの固有角周波数 ω_n , (b) は減衰係数 ζ , (c) は剛性 K による $G(j\omega)$ の変化で、それぞれ Fig. 9, 10, 11 に対応する。Fig. 16 (a) から $\omega_n = 2$ のときに高周波側でゲイン特性がかなり低下していることが分かる。また減衰係数を変化させた場合 (Fig. 16 (b)) は ζ が 0 の場合を除き、系全体の動特性に大き

な変化は見られないが、 $\zeta = 0$ の場合は他の条件に比べ、ゲイン特性が大きく低下している。Fig. 16 (c) も同様にシステムの動特性 $G(j\omega)$ はロボットの動特性 $R(j\omega)$ とかなり似た形を示しており、人間が自らの動特性を調節しきれていないことが分かる。

5. ま と め

本論文では人間-ロボット系の制御特性がロボットのインピーダンスパラメータ、作業者の熟練度、人間の上肢インピーダンスによってどのように変化するかを実験的に解析した。その結果、

- (1) 人間の制御特性がロボット・インピーダンスに応じて大きく変化すること、
- (2) ある範囲のロボット・インピーダンスに対しては系全体の制御特性がほぼ一定に保たれること、

- (3) 不安定特性や大きな操作力を必要とするロボットインピーダンスに対しては、系の制御成績がやや低下すること、
 (4) 人間の上肢インピーダンスの可変性が重要な役割を果たしていること、

などが明らかになった。本論文の結果は、作業対象や作業目的に応じて人間が自らのインピーダンス特性を変化させ、人間-ロボット系の制御特性を積極的に調節していることを意味しており、動力補助ロボットのインピーダンス特性の設計問題 [22] やロボットの手動制御訓練法の構成問題 [23] [24] に対する基礎資料となる。

今後は、作業方向による制御特性の変化、法線方向の手先力 f_y が作業に果たす役割、位置だけでなく力の制御特性などについて詳しく解析するとともに、本論文の結果に基づいて人間支援を目的とした多自由度ロボットの制御法を開発していければと考えている。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (11555113, 11650450) によるものでここに改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] H. Kazerooni: "Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.20, no.2, pp.450-463, 1990.
- [2] 横小路: "マスタ・スレーブ制御の理論", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.6, pp.794-802, 1993.
- [3] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa: "Bilateral control of Master-Slave Manipulations for Ideal Kinesthetic Coupling," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp.849-858, 1992.
- [4] J.E. Colgate: "Robust Impedance Shaping Telemanipulation," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.9, no.4, pp.374-384, 1993.
- [5] K. Kosuge, Y. Fujisawa and T. Fukuda: "Control of Mechanical System with Man-machine Interaction," Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.87-92, 1992.
- [6] K. Kosuge and N. Kazamura: "Control of a Robot Handling an Object in Cooperation with a Human," Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, no.1, pp.142-147, 1997.
- [7] O.M. Al-Jarrah and Y.F. Zheng: "Arm-manipulator coordination for load sharing using compliant control," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1000-1005, 1996.
- [8] O.M. Al-Jarrah and 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.
- [9] R. Ikeura: "Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.24, no.9, pp.1339-1346, 1994.
- [10] R. Ikeura and H. Inooka: "Variable impedance control of a robot for cooperation with a human," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3097-3102, 1995.
- [11] F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: "Neural, mechanical and geometrical factors sub-serving arm posture in humans," Journal of Neuroscience, vol.5, no.10, pp.2732-2743, 1985.
- [12] T. Tsuji, P.G. Morasso, K. Goto and K. Ito: "Human hand impedance characteristics during maintained posture," Biological Cybernetics, vol.72, pp.475-485, 1995.
- [13] 辻, 森谷, 金子, 伊藤: "等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析", 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.2, pp.271-280, 1996.
- [14] T. Tsuji: "Human arm impedance multi-joint movements," Self-Organization, Computational Maps, and Motor Control. P. Morasso (Editor), Elsevier Science B.V., pp.357-381, 1997.
- [15] H. Gomi and R. Osu: "Task-Dependent Viscoelasticity of Human Multijoint Arm and Its Spatial Characteristics for Interaction with Environments," The Journal of Neuroscience, vol.18, no.21, pp.8965-8978, 1998.
- [16] N. Hogan: "Controlling Impedance at the Man/Machine Interface," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1626-1629, 1989.
- [17] 辻, 小山, 金子: "インピーダンス制御に基づく人間-ロボット系の制御特性", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1021-1022, 1996.
- [18] N. Hogan: "Impedance Control: An approach to Manipulation, Parts I, II, III," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.107, no.1, pp.1-24, 1985.
- [19] N. Hogan: "Stable Execution of contact tasks using impedance control," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1047-1054, 1987.
- [20] The MathWorks, Inc.: システム同定ツールボックスユーザーズガイド. 足立修一監訳, サイバネットシステム株式会社, 1996.
- [21] D.T. McRuer and H.R. Jex: "A Review of Quasi-Linear Pilot Models," IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, vol.5, no.8, pp.231-249, 1967.
- [22] 鴻巣, 山田, 森園, 梅谷: "作業条件変動を考慮した手動制御型動力補助ロボットの制御手法に関する研究", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.947-948, 1998.
- [23] 川口, 辻, 金子: "ニューラルネットを利用した人間-ロボット系の適応型訓練システム", 電気・情報関連学会中国支部連合講演会論文集, pp.465-466, 1997.
- [24] 佐野, 藤本, 松下: "コーチングによるスキル伝達(上達過程とウィークポイント)", 第4回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.307-312, 1999.



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年、広島大学大学院工学研究科博士前期修了。同年同大学工学部助手。94年同大学助教授。92年ジェノバ大学(イタリア)客員研究員。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。電気学会、IEEE等の会員(工学博士)。(日本ロボット学会正会員)



加藤 荘志 (Takashi Kato)

1966年6月18日生。1996年広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程後期単位修得退学、同年同大学大学院国際協力研究科助手、現在に至る。ヒトの脊髄神経機構に関する神経生理学的研究、およびヒトの運動制御機構に関する神経科学的研究に従事。日本生理学会、日本運動生理学会、日本バイオメカニクス学会、日本体育学会の会員。



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1981年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。90年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助教授。93年広島大学工学部第二類(電気系)教授。ロボティクスやセンサの研究に従事(工学博士)。(日本ロボット学会正会員)