ロボットの仮想インピーダンス特性に対する主観的評価

○柴田 諭, 田中 幹也, 清水 顕 (愛媛大学工学部)

Emotional evaluation on the mechanical impedance parameters of the robot

Satoru Shibata, Kanya Tanaka, Akira Shimizu (Faculty of Eng., Ehime Univ.)

1 緒言

現在, ロボットは産業分野などで目覚ましい発展を遂げているが, 今後, 高齢化社会に伴い, 社会福祉分野および医療分野などで活躍することが期待されている. このようなロボットは, 人間と同じ動作空間を共有し, 人間のそばに常備されることも考えられる. これらのロボットに不慮に人間が接触した場合, ロボットは人間にとって安全であることは言うまでもないが, 人間の心を落ちつかせ, 安心させるような人間心理にも好ましい応答を示すことが必要である. そこで, ロボットは人間との関わりに応じて自らの仮想機械インピーダンス特性を調節し, 特に人間と接触する可能性がある場合には, 人間にとって安全で, 心理的にも好ましい応答を示すような値を持っていることが望ましい. この観点から, 本報告では, 機械インピーダンスパラメータを可変にした1自由度ロボットに, 人間が直接力や衝撃を加えてその接触力および応答を主観的に評価することにより, 人間と接触した場合にロボットが持つべき機械インピーダンスパラメータ値を人間工学的な視点から検討する.

2 実験装置および実験方法

図1に実験システムの構成を示す. 被験者は, 1軸ロボット (THK社製) のエンドエフェクタに力あるいは衝撃を手のひらで加える. 加えられた力は力覚センサ (ニッタ社製) により測定され, A/Dコンバータを介して計算機に取り込まれる. その値をもとに, 計算機内部の加速度コントローラによって1軸ロボットが仮想機械インピーダンス制御される. なお, 加速度制御のサンプリング時間は10msecである. 仮想機械インピーダンス制御系は, ロボットのエンドエフェクタが力 F を受けたときに, 仮想機械インピーダンス (見かけ上の機械インピーダンス) に基づいて構成された次式の運動方程式を満足するように, ロボットを応答させるように制御する系である.

$$F(s) = M_v \ddot{Z}(s) + C_v \dot{Z}(s) + K_v Z(s) \quad (1)$$

ここで, M_v は仮想質量, C_v は粘性定数, K_v はばね定数である.

この機械インピーダンスにより得られた加速度 $\ddot{Z}$, 速度 $\dot{Z}$, 位置 Z のおおのの指令値にロボットを追

従させるために, 加速度コントローラに基づく軌道追従制御系を構成した.

図1 実験装置

実験は以下のような仮想インピーダンスパラメータ

$$M_v = 3, 7, 11, 20 \quad (\text{kg})$$

$$C_v = 20, 50, 150, 200 \quad (\text{N} \cdot \text{sec/m})$$

$$K_v = 30, 80, 130 \quad (\text{N/m})$$

の全ての組み合わせ (48 個) について, 10 人の被験者が主観的評価を行うものである. ただし, これらのパラメータの値はさらに細かいパラメータの組み合わせについて 10 数名の被験者によって予備実験を行ったところ, 評価の傾向を示す代表的な値であるといえるものであったので採用した.

被験者はエンドエフェクタに力あるいは衝撃を手のひらで加え, その感触, ロボットの応答を見て評価を評定用紙に記入する. この手法は評定尺度法に基づくものであり, 図2のような4つの形容詞対に対して, 7段階のいずれかに丸印を付けることによって行う.

また, これらの形容詞対は, 人間と同じ動作空間を共有するロボットに不慮に接触した場合を 10 数名に想像してもらい, ロボットが安全で人間心理にとって好ましい反応を示すべきであるという観点から想像される形容詞対を列挙し, その中から同じような範疇に入るものは1つにまとめるなどして絞り込んだものである.

3 実験結果

実験結果の1例として、 $M_v=11(\text{kg})$, $C_v=20(\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m})$, $K_v=80(\text{N}/\text{m})$ のときの評価を図2に示す。ただし、図では尺度上の各段階に1から7までの得点を与え、全ての被験者についての平均値と分散を各形容詞尺度に対し示した。

図2 評価の一例

仮想インピーダンスパラメータと人間が受ける印象の関係を調べるために、仮想インピーダンスパラメータを説明変数にとり、評定平均値を被説明変数にとる回帰モデルで結果を説明することを試みた。

$$Y = \beta_1 M_v + \beta_2 C_v + \beta_3 K_v + \beta_0 \quad (2)$$

柔らかさについては、

$$\beta_1 = 0.1184, \beta_2 = 0.0193, \beta_3 = -0.0006$$

快さについては、

$$\beta_1 = 0.0840, \beta_2 = 0.0108, \beta_3 = -0.0007$$

人間らしさについては、

$$\beta_1 = 0.0697, \beta_2 = 0.0089, \beta_3 = 0.0008$$

であった。これらは、実験値をよく再現することを確認した。

また、偏回帰係数の検定を行ったところ、これらの印象についてはいずれも M_v , C_v が有意水準 2.5 % で評定平均値に影響を与えていることが確かめられた。

安全な印象についてはこのモデルでは説明できなかったが、図3に示されるような4つの代表的な評価が得られた。ただし、

- A: $M_v=11(\text{kg})$, $C_v=150(\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m})$, $K_v=30(\text{N}/\text{m})$
- B: $M_v=7(\text{kg})$, $C_v=200(\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m})$, $K_v=30(\text{N}/\text{m})$
- C: $M_v=7(\text{kg})$, $C_v=50(\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m})$, $K_v=30(\text{N}/\text{m})$
- D: $M_v=3(\text{kg})$, $C_v=20(\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m})$, $K_v=30(\text{N}/\text{m})$

である。これらはエンドエフェクタとの接触力、ロボットの応答に基づき、以下の様に考察される。ただし、ロボットの応答を表すパラメータとして、人間心理に大きな影響を与えるといえる速度を考えた(図4)。

- A は、大きな力が加わっているが応答速度が小さいもので、悪い印象となった。これは、被験者がロボットの剛性に対し危険な印象を受けているためといえる。
- B は A に比べると、加わっている力が小さく、応答速度は大きいもので、良い印象となった。これは、被験者はロボットにやや剛性を感じてはいるが、ロボットの動きはゆっくりであり安全であると判断したためと考えられる。
- C は加わった力、応答速度とも適度であり、全ての形容詞対について正な印象が得られた。人間心理に好ましいパラメータの組み合わせであると思われる。
- D は、加わった力は小さいが応答速度が大きいもので、悪い印象となった。これは、ロボットの過剰反応に危険であると被験者が感じたためであろう。

図3 安全な印象の代表的評価

図4 安全な印象を決める接触力およびロボットの応答速度