皮膚電気反射を利用したマスタ支援型ロボットによる 人体に対する安全接触倣い作業*

則次俊郎^{*1}, 井上浩行^{*2}

Safely Contacting Task with Human Body by Master-Assisted Robot Using Galvanic Skin Reflex

Toshiro NORITSUGU^{*3} and Hiroyuki INOUE

^{*3} Tsuyama National College of Technology, 624-1 Numa, Tsuyama-shi, Okayama, 708-8509 Japan

A cooperative control approach between human and robot is important for an assisting robot coexisting with humans in medical service and welfare. The safety measures against the human are important function for the human-robot coexistence system in which a robot makes contact with a part of the human body. In order to relieve a human from pricking pain, a safety of the human is quantitatively evaluated based on an awful feeling and an uncomfortable feeling detected using galvanic skin reflex which expresses emotions of the humans. In this paper, the degree of cooperation between human operator and robot is adequately adjusted by the fuzzy reasoning based on the psychological safety of the human who is assisted by the robot. The proposed cooperative control system is applied to a pneumatic robot with three degrees of freedom. The experimental results indicate that it is possible to ensure the safety of the experimental subject by measuring the personal feelings.

Key Words: Robot, Reasoning, Working Conditions, Maneuverability, Human Engineering, Emotion Cooperative Control, Fuzzy Rule

1. 緒言

少子高齢化社会の到来により, 医療・福祉分野において, 人間共存型ロボットの実現が期待されている。このロボットは, 障害者や高齢者と生活環境を共にして日常生活を営む上で必要な動作補助を行う。このようなロボットは, 人間との接触に対する安全性を確保しながら, 動作補助を受ける人間に親しみを感じさせることが重要であり, ロボットの外観や動作から受ける違和感や恐怖感を軽減しなければならない⁽¹⁾。

山田ら⁽²⁾⁽³⁾は, 人間が受ける機械的刺激に対して耐えられる限界を痛覚耐性値と定義し, この値を指標としてロボットシステムの安全性を評価した。また, ロボットと共存する人間心理に関する研究として, 池浦ら⁽⁴⁾は, 人間に接近する機械運動において種々の異なる速度パターンに対して皮膚電気反射を測定することで, 恐怖や驚きといった感情を評価した。柴田ら⁽⁵⁾は, 人間と機械の接触時に人間が機械の動作から受ける感情を評定尺度法を用いて評価した。こ

れらの研究は, 被験者の主観的な感情の聞き取り調査に基づく指標を示しており, ロボットシステムの安全性を評価する上では有用であるが, その指標は予め決められている一連のロボット動作に対する評価であることに注意しなければならない。例えば, ロボットに人間との接触を有する介護作業を行わせるとき, 被介護者の皮膚にすでに損傷がある場合には, ロボットの押し付け力が小さくても痛みを与えるため, 作業状況や作業を受ける人体部位によって痛覚耐性値は変化する。また, ロボットの動作が同じであっても, 体調や年齢によって被介護者が感ずる感情は異なる。よって, 時々刻々と変化する作業状況に対応するためには, 被介護者の感情を常に把握する必要がある。

本論文では, ロボットによる介護作業中に被介護者が感ずる痛みを緩和するため, 痛みによって生ずる生体反応を測定することにより, 被介護者に適応した安全機能を有するシステムを構成する。痛みとは損傷と結びつく不快な身体的・感情的体験であるため, 被介護者が感ずる痛みを直接把握することは困難である。そこで, 皮膚電気反射を利用して痛みによって生ずる感情を数値化し, これを被介護者の感情の指標として導入する。

また, 作業中に生ずる不具合に柔軟に対応する適応

* 原稿受付 2000年10月18日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(☎700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 正員, 津山工業高等専門学校(☎708-8509 津山市沼624-1)。

E-mail: inoue@tsuyama-ct.ac.jp

性をロボットに持たせるため、著者らがすでに提案している人間とロボットの協調制御法⁽⁶⁾を用いる。これにより、被介護者の感情に基づく安全機能と介護者の能力を組込んだ協調制御系を構成することができる。被介護者が感ずる痛みが感情を通して把握されると、介護者はマスタ操作でロボットの動作を修正して被介護者の痛みを緩和させる。また、介護者がロボットの動作を修正することでシステムの作業性が低下するため、システムの作業性と被介護者の安全性を効率的に確保する手法を提案する。構成したシステムの有効性を確認するため、3自由度の空気圧ロボットを用いて、介護作業を想定した接触微い作業を行う。

2. システムの構成

介護作業には、身体的な作業のみでなく親しみや安らぎといった心理的なケアも含まれるため、介護ロボットは人間と同じように、安全で優しく機能的でなければならない。そこで、ロボット制御にマスタ操作を介して人間の知的判断能力を反映させるため、マスタ支援型のロボットシステムを構成する。その概念を図1に示す。ロボットによる介護作業中に不具合が生じた場合、介護者はそれに対応するために視覚情報とマスタからの力覚情報に基づき、マスタ操作を介して作業内容を一部修正したり、作業を中断する。

2・1 介護者とロボットの協調制御 介護作業の一つとして、被介護者の身体をなぞる、さすといった接触微い作業をロボットに行わせる。このような作業では、人体表面の法線方向に対しては、押し付け力の保持が要求されるためロボットが自律的に力を制御し、接線方向に対しては、ロボットを移動させるため介護者がマスタ操作で位置を制御する。位置制御法としては、ロボットに柔らかさを持たせるためにインピーダンス制御法を用いる。

介護者とロボットの協調制御系を図2に示す。ここで、 F 、 F_d は押し付け力、押し付け力の目標値、 X はロボット手先の位置を示す。 V_d 、 X_d は介護者のマスタ操作により生成されるロボットの目標手先速度、目標手先位置、 X_0 は人体表面の位置、 H_v は速度を位置の

次元に変換するための関数、 G_e は被介護者の動特性、 P は作業座標系におけるロボットの特性を示す。ここで、動特性モデル G_f 、 G_p は

$$\begin{aligned} G_f &= \frac{1}{M_f s^2 + B_f s + K_f} \\ G_p &= \frac{1}{M_p s^2 + B_p s + K_p} \end{aligned} \quad (1)$$

である。 M_f 、 B_f 、 K_f は力を位置の次元に変換するための仮想慣性行列、仮想粘性行列、仮想剛性行列である。 M_p 、 B_p 、 K_p はロボット手先の目標インピーダンスを表す目標慣性行列、目標粘性行列、目標剛性行列である。 S は各座標軸に対して介護者とロボットの協調度合いを決定する対角行列で、優先行列と呼ぶ。 I は単位行列である。優先行列の要素が零であれば介護者のマスタ操作による位置の直接制御、1であればロボットによる力の自律制御、零と1の間にあれば介護者とロボットの協調制御が実行される。

座標軸 i に対して協調制御を実行して押し付け力を調整するとき、介護者がマスタ操作で生成するロボットの目標手先速度 v_{di} と押し付け力の目標値 f_{di} を入力、押し付け力 f_i を出力とすると次式が得られる。

$$f_i = \frac{\{v_{di} H_v (1 - s_i) + f_{di} G_{fi} s_i\} G_{ei} P}{1 + \{G_{ei} \{G_{fi} s_i + G_{pi} (1 - s_i)\} - s_i\} P} \quad (2)$$

式(2)より f_{di} を一定値とすると、 f_i は v_{di} および優先行列の要素 s_i で調整することができる。

s_i と f_i の関係は動特性モデル G_f 、 G_p によって決定されるため、 s_i を用いて $0 \leq f_i \leq f_{di}$ の範囲で押し付け力を調整することができる。 s_i の値が0.5より小さければ介護者の貢献度が高いため f_i は小さくなり、0.5より大きければロボットの貢献度が高いため f_i は大きくなる。

2・2 介護作業の問題点と対策 ロボットによる接触作業中に問題となるのが、作業を受ける人体部位の変化や損傷などにより被介護者が痛みを感じたときの対応である。介護者は、言葉、ジェスチャー、表情などに基づいて被介護者の感情を把握することにより、マスタ操作を介して痛みを緩和することができ

Fig.1 Master-assisted robot system

Fig.2 Block diagram of cooperative control system

る。しかし、被介護者にコミュニケーション能力の低下がある場合には、被介護者の感情が無視され痛みを与え続けることになる。そこで、作業中の被介護者の感情を確実に把握するため、人間の生体反応の一つである皮膚電気反射を利用して被介護者の感情を把握する。本研究では、被介護者が恐怖、驚き、不快といった感情を受けていない状態を「安全」と定義する。

2・3 優先行列の要素生成 マスタ支援型のロボットシステムにおける指令の流れを図3に示す。介護者は視覚情報とマスタからの力覚情報に基づき、マスタ操作により作業意図を表すマスタ操作量 h_{mi} とロボットの目標手先速度 v_{di} を生成することで、ロボットに接触作業を行わせる。被介護者の安全性が確保されていれば、目標の押し付け力 f_{di} を保持するため、ロボットの貢献度を高めて力の自律制御を実行する。被介護者が痛みを感じると、押し付け力を減少させて痛みを緩和するため、介護者の貢献度を高めて協調制御を実行する。介護者にとっては、マスタ操作により被介護者の安全性が確保し易く、その負担を軽減するためにもシステムの作業性が良いことが望まれる。そこで、システムの作業性と被介護者の安全性を定量的に評価するパラメータを導入し、このパラメータに基づいて介護者とロボットの協調度合を決定する。

多重ファジィ推論を用いた優先行列の要素 s_i の生成過程を図4に示す。推論方式には簡略化ファジィ推論⁽⁷⁾を用いる。ファジィ推論1では、システムの作業性を定量的に評価するため、介護者の作業意図を表すマスタ操作量 h_{mi} と接触状態を表すセンサ情報量 $f_{di}-f_i$ を入力とし、目標の押し付け力の達成の度合いを零から1の実数値 α_i として推論する。作業意図とは押し付け力の目標値を上限とし、介護者の判断によって決められる痛みを緩和するのに適した押し付け力である。

Fig.3 Command flow in master-assisted robot system

Fig.4 Structure of multiple fuzzy reasoning

よって、人間の能力は介護者によるマスタ操作量 h_{mi} を通して s_i の生成に反映される。 $h_{mi}=0$ は押し付け力が零、 $h_{mi}=5$ は目標の押し付け力に対応する。人間は作業状況を定量的に認識する尺度を持っていないため、接触状態を表すセンサ情報 $f_{di}-f_i$ を用いることで介護者の誤った作業意図に対処する。ファジィ推論2では、被介護者の安全性を定量的に評価するため、被介護者の感情を表す皮膚電位 h_{pi} とロボット手先の速度 v_i を入力とし、被介護者の安全の度合いを零から1の実数値 β_i として推論する。安全性の評価に対する信頼性を向上させるため、人間の心理に影響を与える要因であるボットの動作⁽⁸⁾として、ロボット手先の速度を用いた。ファジィ推論3では、 α_i と β_i を入力とし、優先行列の要素 s_i を零から1の実数値として推論する。

図5にメンバーシップ関数、表1にファジィルールを示す。表1(a)のファジィテーブルの行は変数 h_{mi} 、列は変数 $f_{di}-f_i$ 、テーブルの内部はそれぞれのルールに対する後件部 α_i の値である。例えば、押し付け力 f_i が目標値より大きいとき、マスタ操作量 h_{mi} が小さければ α_i を小さくし、 h_{mi} が大きくなれば α_i を大きくする。押し付け力が目標値より小さくなれば α_i が小さくなるようにルールを設定する。また、 h_{mi} が大きくなれば α_i が大きくなるようにルールを設定する。

表1(b)のファジィテーブルの行は変数 h_{pi} 、列は変数 v_i 、テーブルの内部はそれぞれのルールに対する後件部 β_i の値である。例えば、皮膚電位 h_{pi} の絶対値が小さければ β_i が大きくなり、 h_{pi} が大きくなれば β_i が小さくなるようにルールを設定する。また、予め被介護者が恐怖を感じずロボット手先の速度を調べておき、これより速度 v_i の絶対値が大きくなれば β_i が小さくなるようにルールを設定する。

表1(c)のファジィテーブルの行は変数 α_i 、列は変数 β_i 、テーブルの内部はそれぞれのルールに対する後件部 s_i の値である。被介護者の痛みに対応する介護者が初心者であったり、被介護者に身体的な損傷を与える可能性が高い作業に対しては、被介護者の安全性を重視してルールを設定するのが好ましい。また、介護者がマスタ操作に慣れ、被介護者に身体的な損傷を与える可能性が低い作業に対しては、システムの作業性を重視してルールを設定するのが好ましい。

本研究では、介護者は初心者であり、作業中は被介護者との十分なコミュニケーションが行えないと仮定し、被介護者の安全性を重視してルールを設定する。例えば、 α_i が小さければ介護者の貢献度を高くし、 α_i が大きくなればロボットの貢献度が高くなるようにルールを設定する。また、 β_i が大きくなればロボット

Fig.5 Membership functions

の貢献度が高くなるようにルールを設定する。

3. 実験システム

実験に用いたロボットの概形を図6に示す。このロボットは、3自由度を有する多関節型の空気圧ロボットで、可動部を軽量化するためにアクチュエータを静止フレーム上に配置することのできる平行リンク機構を採用している。アーム長さは、それぞれ400mm, 400mm, 100mmである。

制御システムの構成を図7に示す。介護者が操作するマスタマニピュレータとしては、ロボットの押し付け力を介護者にフィードバックすることのできる6軸

Fig.6 Experimental pneumatic robot

Fig.7 Experimental control system

のFF-JOYARM（三井造船製）を用いる。被介護者の感情を表す皮膚電気反射（G.S.R.）の状態量はA/D変換ボード、マスタマニピュレータの状態量は専用のインタフェースユニットを介してパソコンに送られる。ロボットに取り付けられているロータリーエンコーダ、力センサ、圧力センサで検出された状態量は、カウンタボード、レシーバボード、A/D変換ボードを介してパソコンに送られる。パソコン内ではそれらの情報に基づいてマスタマニピュレータおよび空気圧ロボットの制御信号を生成し、インタフェースユニットとD/A変換ボードを介して各ドライバに送られる。制御プログラムはC言語で記述し、サンプリングタイムは4.19msである。

4. 実験結果および考察

構成したシステムの有効性を確認するため、空気圧ロボットの動作範囲を鉛直平面内に限定し、図8に示すように被験者（被介護者）の左前腕に対して接触微い作業を行う。ロボット手先の前方左側にロボットと向かい合うように被験者を立たせ、腕は押し付け力により動かないように軽く保持する。被験者は20歳の男子学生である。

x軸方向は、被験者が感ずる痛みに対応するため、操作者（介護者）はマスタ操作により h_{mx} を生成して押し付け力を調整し、痛みを緩和することで被験者の安全性を確保する。y軸方向は、被験者の手首付近から肘関節の方向へ約5mm/sの速度でロボットを移動させる。この5mm/sの速度は被験者に恐怖感を与えないため、恐怖感などはx軸方向のみで与えられる。被験者の感情は、右手の2本の指に取り付けられた電極によ

Fig.8 Contact task with human body

り, -10V から 10V の皮膚電位 h_{px} として測定される。

以下の実験で用いる動特性モデルのパラメータは, $M_f = \text{diag}(10, 10)\text{kg}$, $B_f = \text{diag}(200, 200)\text{Ns/m}$, $K_f = \text{diag}(1000, 1000)\text{N/m}$, $M_p = \text{diag}(20, 20)\text{kg}$, $B_p = \text{diag}(400, 400)\text{Ns/m}$, $K_p = \text{diag}(500, 500)\text{N/m}$ とする。これらの値は, 被験者が力または位置制御されているロボット手先に左前腕を押し付け, ロボットの動作が人間に近いと感ずる動特性モデルである。押し付け力の目標値は, 被験者に痛みを与えない 10N とする。

4・1 押し付け力から受ける感情 被験者が押し付け力から受ける感情を調べるため, 皮膚電気反射の測定と聞き取り調査を行う。x 軸方向に力制御のみを実行し, 10 秒後に押し付け力の目標値をステップ状に増加させた結果を図 9 に示す。押し付け力の増加分が大きくなると皮膚電位 h_{px} も大きくなっている。また, 被験者からの聞き取りにより, 予期しない力変動に対しては驚き, 押し付け力が大きくなると恐怖を感じている。これにより, 被験者が感ずる恐怖, 驚きといった感情は, 皮膚電気反射測定器を用いて測定できると考えられる。

皮膚電位は, 感情による刺激が与えられると, 発汗作用により皮膚の抵抗値が変化することで現れる。そのため, 図 9 より押し付け力が変化して皮膚電位が生じるまで約 0.8 秒かかることがわかる。よって, 皮膚電気反射を利用して被験者の安全性を評価するためには, この応答遅れに対して被験者の安全性が許容できる作業に適用しなければならない。本論文では, 作業中に急激に被験者の危険性が増加する恐れがない, 定常的な作業である接触做い作業に適用する。

4・2 接触做い作業 介護者が作業状況を監視することで被介護者の損傷部が認識できれば, 接触により痛みを感ずることが予測できるが, 服の上から認

識することは困難である。そこで, このような不測の事態を模擬するため, 作業を開始して約 1.2 秒後に痛みを感ずるように, 被験者の腕に長さ 25mm , 幅 5mm , 厚さ 0.5mm の金属製のプレート貼り付け, 操作者に見えないように服の上から接触做い作業を行う。

図 10 (a) は被験者の感情に基づいて痛みを緩和した結果で, 操作者は目標の押し付け力を得るためマスタ操作で $h_{mx}=5$ を生成している。約 1.2 秒後, 痛みによる皮膚電位 h_{px} が生ずると被験者の安全の度合いが $\beta_x < 1$, 優先行列の要素が $0 < s_x < 1$ となり協調制御が実行される。 s_x の値に応じて押し付け力が減少するため, 目標の押し付け力の達成の度合いが $\alpha_x < 1$ となり, システムの作業性が一時的に低下する。約 2.5 秒後に被験者の感情が落ち着き $\beta_x = 1$ となると, それに伴って $\alpha_x = s_x = 1$ となり, ロボットによる力制御が実行される。被験者が痛みを感ずると, 約 2.3 秒間にわたって協調制御を実行して押し付け力を減少させているため, 被験者の皮膚電気反射を利用した安全性の評価は接触做い作業において有効であると考えられる。しかし, 約 1.6 秒後から皮膚電位 h_{px} が生じており, 被験者が押し付け力の増加に対して恐怖を感じたため, 安全な接触做い作業を行うことができなかった。

図 10 (b) は作業中の被験者の安全性を確保するため, 操作者が作業意図を変更して押し付け力を目標値に到達させた結果である。約 1.2 秒後, 操作者は協調制御に切換わるとマスタ操作で $h_{mx}=4$ を生成し, 約 2.5 秒後から徐々に $h_{mx}=5$ に近づけている。図 10 (b) より押し付け力は滑らかに目標値に到達しており, このとき皮膚電位 h_{px} は生じていない。操作者が $h_{mx}=4$ を生成しているとき, s_x が α_x と β_x の約中間の値を示しているため, システムの作業性と被験者の安全性が確保されている。その後, $4 < h_{mx} < 5$ の範囲で s_x が β_x によく一致しているため, 被験者の安全性が重視されている。よって, 操作者の比較的簡単なマスタ操作で安全な接触做い作業を行うことができる。

図 10 (c) はさらに被験者の安全性を高めるため, 接触做い作業を中断した結果である。約 1.2 秒後, 操作者はマスタ操作で $h_{mx}=5$ を生成したまま瞬時にロボットを後方に移動させるため, 協調制御に切換わると同時に $v_{dx} = -15\text{mm/s}$ を生成している。マスタ操作で v_{dx} を生成してロボットを移動させることで, 接触状態から非接触状態への連続性を保っている。図 10 (c) より大きな皮膚電位 h_{px} が生じているため, 先の実験に比べて被験者は強い痛みを感じている。

図 10 (d) は服を介さないで操作者が作業状況を監視できる状態で接触做い作業を行った結果で, 操作

Fig.9 Experimental results

者の予測能力を用いて痛みを緩和している。約9秒後、操作者は被験者が感ずる痛みを予測し、マスタ操作で $h_{mx}=4.1$ を生成して協調制御を実行することによ

り、約8秒間にわたって押し付け力を減少させている。図10(d)より小さな皮膚電位 h_{px} が生じているが、先の実験に比べて被験者の痛みは緩和されている。よって、マスタ操作を介して人間の能力を制御に反映させることにより、作業中に生ずる不具合に柔軟に対応することができる。

5. 結論

本研究では、作業中に被介護者が感ずる痛みに対応するため、システムの作業性と被介護者の安全性を定量的に評価し、この評価に基づき介護者とロボットの協調制御を実行することで痛みを緩和するシステムを構成した。本システムを空気圧ロボットに適用し、接触做い作業を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 被験者の感情を皮膚電気反射測定器を用いて測定することにより、作業中に被験者が感ずる痛みを確実に把握することができる。

(2) 操作者の能力、被験者の感情およびロボットの状態検出機能を融合することにより、操作者の熟練度や作業内容に適したシステムの作業性と被験者の安全性を定量的に評価することができる。

(3) システムの作業性と被験者の安全性を確保するため、作業状況に応じて操作者とロボットを適切に協調させることにより、操作者の比較的簡単なマスタ操作で空気圧ロボットに安全な接触做い作業を行わせることができる。

本システムは、作業対象者の感情を考慮して安全性を評価するため、親しみや安らぎといった心理面を重視するロボットシステムとして有効である。最後に、本研究は油空圧機器技術振興財団の助成によって行われました。ここに感謝の意を表します。

文献

- (1) 中田亨, 他3名, ロボットの対人行動による親和感の演出, 日本ロボット学会誌, 15-7, (1997), 1068-1074.
- (2) 山田陽滋, 他5名, ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 機論, 63-612, C (1997), 2814-2819.
- (3) 山田陽滋, 他4名, 痛覚耐性値に基づく安全な人間検出および停止機能を有するロボットシステム, 機論, 63-614, C (1997), 3552-3557.
- (4) 池浦良淳, 他2名, 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察, 人間工学, 31-5, (1995), 355-358.
- (5) 柴田諭, 他2名, 人間心理を考慮した機械インピーダンス特性, 機論, 64-624, C(1998), 3055-3061.
- (6) 則次俊郎, 井上浩行, マスタ支援による人間とロボットの協調接触動作制御, 機論, 65-636, C(1999), 3290-3295.
- (7) 水本雅晴, ファジィ制御向きのファジィ推論法, 計測と制御, 28-11, (1989), 959-963.
- (8) M.Rahimi, and W.Karwowski, Human perception of robot safe speed and idle time, Behave. Inf.Technol, 9-5 (1990), 381-389.

Fig.10 Experimental results