SD法を用いたロボットの人間回避運動の心理的分析*

山本智規^{*1}, 柴田 論^{*2}
神代 充^{*2}, 清水 顯^{*2}Psychological Analysis of Avoidance Motion of Robots
Using Semantic Differential MethodTomonori YAMAMOTO^{*3}, Satoru SHIBATA,
Mitsuru JINDAI and Akira SHIMIZU^{*3} Faculty of Engineering, Ehime University, Bunkyo-cho 3, Matsuyama, Ehime, 790-8577 Japan

For the coexistence of human and robots, it is important for robots to have not only a physical safe but also a psychological safe. When we consider avoidance motion of robots from an unexpected human approach, it is necessary for robots to have comfortable motion that can ease a psychological burden. In this research, we adopt a control strategy in which a robot follows human motion at an interval of desirable distance in front of the human firstly. Next, we evaluate human emotions to the avoidance motion of the robot that follows the strategy using SD method. The results of SD method show that the adopted control strategy is excellent when the distance and motion speed of given task are appropriate simultaneously, and that human emotions to the avoidance motion are represented by the factors of "speed" and "agreeability".

Key Words: Collision Avoidance Motion, Human Emotion, Human-Robot System, Human Interface, SD Method

1. 緒 言

従来, ロボットは, 工場での繰返し運動や原子炉での極限作業のように, どちらかといえば人間と隔離された空間でその能力を発揮してきた。しかしながら今後, 高齢化社会における医療福祉や就労支援等の目的で, 人間と日常空間を共有して活躍するロボットが求められている。ロボットと人間が同一空間で共存することを考えたとき, ロボットは人間と衝突して肉体的にダメージを与えてはならないことは当然であるが, 生成する運動が人間の自由な運動を妨げるものであってはならず, 恐怖や違和感を抱かせない, 人間心理に好ましいものであることが望ましい。そのためには, ロボットは人間の接近に対して, ただ単に接触しないように回避するのではなく, 人間に受け入れられるような回避戦略, 運動特性を示すべきである。

ロボット工学の分野では, これまでにポテンシャル法やコンフィグレーション空間法に代表される障害物回避の研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽⁴⁾。これらの研究

では最短時間を規範としたり, エネルギーや時間に基づく動力学的解析に重点が置かれている。しかしながら, 人間を対象に, 特に人間心理を考慮した回避運動についての研究は, ほとんど行われていない。

一方, ロボット運動と人間心理の関係を解明することを目指した研究が最近になって活発である。手嶋ら⁽⁵⁾は, スカラ型ロボットを用いた恐怖心の評価を行い, 人間の恐怖心は速度よりも距離に影響されることを明らかにした。また, 池浦ら⁽⁶⁾は生体信号を用いたロボットの動きの評価を行い, 最大速度が恐れに感情に, 加速度変化が驚きの感情にそれぞれ関係があることを明らかにした。小川ら⁽⁷⁾は機械の運動を種々の速度パターンのもとでSD法⁽⁸⁾を用いて感情評価した。その結果, 人間特有のやわらかさを有する運動, すなわちサイバネティックモーションを機械運動に応用すれば人間がよい感情を抱くことを明らかにした。また, Shibataら⁽⁹⁾は産業用ロボットの二関節運動を種々の速度パターンについて評定尺度法を用いて心理評価し, 最大速度, 速度ピークの位置が心理に影響を与える重要な因子であることを示すと同時に, 小川ら⁽⁷⁾と同様, 人間が生成する滑らかな速度パターンも望ましい候補の一つであることを示している。これらの研究報告を考慮すると, ロボットが人間の接近に対

* 原稿受付 1999年12月15日。

^{*1} 愛媛大学大学院(〒790-8577 松山市文京町3)。^{*2} 愛媛大学工学部。

E-mail: yamamoto@cont2.me.ehime-u.ac.jp

して回避運動を行う場合も、人間とロボットの距離、速度が人間にとって望ましいものとなるように制御則が設計されるべきであるといえる。また、人間の生成する運動軌道に近い軌道をロボットが生成することも、人間心理に好ましい運動となるためには重要である。

そこで本報告では、ロボットの人間回避運動の制御則として、人間の顔正面方向の運動を人間の接近運動に一定の距離を置いて追従することにより回避する方法を採用する。これは非常に単純な方法であるが、人間の上肢二点間運動が躍度最小モデル⁽¹⁰⁾で近似できることを考えると、それに追従するロボット運動も滑らかな加速度変化を伴う軌道となることが期待されるからである。本報告では、その一定の距離、タスク方向運動速度と人間心理の関係を、SD法を用いた心理評価により解析する。また、その結果から提案した手法の有用性と、望ましいパラメータ値を検討する。

2. ロボットの回避運動の制御則

ロボットが人間の接近に対して回避運動を行う場合、その運動が人間心理に好ましいものであるためには、速度、加速度といった運動軌道に注意を払う必要がある。人間は自分自身(特に顔の正面)に向かってくる方向のロボット運動に対して最も強く心理的变化を示すと考えられる。そして、池浦ら⁽⁶⁾の報告にあるように、突然の加速度変化に対してよい感情を抱かないということがいえる。そこで、人間の顔に対して正面方向の運動については、ロボットは特に滑らかな運動を生成する必要がある。

また、手嶋ら⁽⁵⁾はスカラ形ロボットアームの水平面内回転運動に対する人間の恐怖心について検討した。その報告の中で彼らは、ある程度の距離以上離れていると、たとえロボットの動作速度が大きくとも人はあまり恐怖心を抱かないが、逆に距離が接近すると速度があまり小さくなくても恐怖心を強く抱くことを明らかにした。これより、人間の接近に対するロボットの回避運動においても、ある一定の距離よりは接近しないよう配慮すべきであると考えられる。

一方、人間の手先の二点間運動は、式(1)に示される評価関数を最小にする躍度最小モデル⁽¹⁰⁾で表現できることが知られている。ただし、 $X_v(t)$ は仮想軌道、 t_f は動作時間を表す。式(1)を最小にする軌道は解析解が得られ、その位置、速度軌道の概形を図1に示す。図1中、縦軸および横軸は正規化を行っている。

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left(\frac{d^3 X_v(t)}{dt^3} \right)^T \left(\frac{d^3 X_v(t)}{dt^3} \right) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1 Minimum jerk model

図1のように、位置の変化は非常に滑らかなものとなり、速度の変化も左右対称の釣鐘型の滑らかな変化を示している。躍度最小モデルは、人間の動きが非常に滑らかなものであることを示しており、Shibataら⁽⁹⁾の報告にもあるように、この人間の動きをロボット等の知能機械に適用することができれば、その動きは滑らかな加速度変化を伴う、人間の感情に受け入れられやすいものとなることが期待できる。

これらのことから、人間の顔に対して正面方向のロボット運動は、一定の距離を置いて人間の運動を追従する(以下、この一定の距離を「追従距離」と呼ぶ)という制御則を採用する。これによって、ロボット運動は躍度最小モデルで表される滑らかさをもつことになり、人間心理に好ましいものとなることが期待できる。本報告では、追従距離の大きさと人間心理の関係を明らかにしながら、採用した制御則の有効性を検討する。

一方、ロボットには、物体をある位置から別の位置へ移動させるというタスクを与える。ここでは、与えられたタスクの運動特性と人間心理の関係に注目する。Shibataら⁽⁹⁾の報告には、ロボットの運動方向が人間への接近方向と異なる場合でも、運動速度は人間心理に影響を与える重要な要素の一つであることが示されている。そこで、タスク方向の運動速度の大きさについても、追従距離の大きさと同時に、人間心理との関係を明らかにする。

3. 実験

採用した制御則の有用性と望ましい二つのパラメータ値(すなわち、追従距離とタスク方向運動速度)、および回避運動が人間の感情にどのような影響を与えるかを明らかにするために、実在の二軸ロボットを用いた心理的評価実験を行う。具体的には、採用した制御則を、ある追従距離とタスク方向速度のもとで二軸ロ

ボットに再現させる。その二軸ロボットに対して、人間の手先をタスク軌道上へ差し出すことにより生成された回避運動に対する心理評価をSD法を用いて行う。これを種々の追従距離とタスク方向速度のもとで行い、得られた結果を解析する。

3.1 実験装置 図2に実験装置の概要を示す。回避運動を行うロボットとして、DCサーボモータで駆動する二軸直交形ロボットを使用する。ロボットの位置は、ロータリエンコーダからのパルス信号を、24ビットカウンタボードを介して計算機(16ビットコンピュータ)に取込むことにより測定される。人間の手先位置の検出にはPSDカメラに基づくセンサシステムを用いる。手先に取付けたLEDマーカをPSDカメラで検出し、得られたアナログ信号が12ビットA/D変換器を介して計算機に取込まれ、位置データに変換される。そのデータをもとに計算機で算出されたロボットの操作量を、12ビットD/A変換器、ドライバを介してDCサーボモータへ送り、位置制御を行う。このロボットは高精度で目標軌道を生成できる。また、系のサンプリング時間は5ミリ秒とする。

3.2 実験方法 本報告では、人間のそばで人間のために活躍するロボットを想定している。そのような環境での人間とロボットの関係は多種多様に存在するが、本報告は基礎的な研究であるので、以下のよう

な単純な人間とロボットの関係を取り上げる。

図3のように人間に正対して、人間と作業空間を共有する位置にロボットを配置する。図3のX軸方向については、ロボットに物体のある点から別の点に一定速度で運ぶタスクを与える。物体はアルミニウム製の円柱で、直径45mm、高さ135mmである。被験者はいすに座った状態で、被験者の目とロボットのエンドエフェクタが同じ高さになるよう設定した。これは、人間の恐怖心は人間の顔とエンドエフェクタの距離に深い関係があること⁽⁶⁾が示されているためである。ロボットが動き始めると、被験者はロボットのタスクを遮るようにA点からB点に手先を差し出す。人間の手先がロボットに近づくと、ロボットは与えられた追従距離を保つように回避運動を行う。

実験において評価されるパラメータである追従距離とタスク方向速度は、予備的に実験を行い決定した。ここでは、一対比較により、基準となるパラメータ値と有意に異なると判断された動きのパラメータ値を探し、これを新たな基準値とする。この作業を繰返すことにより代表的なパラメータを決定した。決定されたパラメータを表1に示す。

3.3 SD法による感情評価 上記のパラメータ値のもとに行われるロボットの回避運動を刺激とし、この刺激に対する被験者の感情をSD法により評価する。SD法は、相反する形容詞対を両極にもつ数個の段階尺度に基づく評定手法として知られている⁽⁸⁾。評価に使用する形容詞対は、次のような指針に従う必要がある。

- ・刺激の“意味”が変化するあらゆる範囲にわたって、その意味を代表するものでなければならない。
- ・形容詞対は適切な反意語を選ぶ。「…ではない」という表現は原則として用いない。
- ・できるだけ感覚的、直感的なものを用いる。

また、小川ら⁽⁷⁾は、物体の動き(板の上下運動)を刺激対象とし、サイバネティックモーションと他の動き(一定速度、2段変速度、サイクロイダル)を見たときの感情をSD法により分析した。そして、得られたSD評価結果に対して、どの運動パターンが好ましいかという観点から検討した結果、サイバネティックモーションをその候補としてあげている。本報告は動き

Table 1 Following distance and velocity in the task direction

Following distance (mm)	100	150	200	250
Velocity in the task direction (mm/sec)	100	200	300	400

Fig. 2 Experimental setup

Fig. 3 Experimental method

を評価するという点では小川らの報告と一致しており、その心理評価法は参考にするべきものである。そこで、種々の追従距離とタスク方向運動速度の組合せにおける回避運動について、心理評価をSD法により行う。さらに、得られたSD評価結果について、人間とロボットの共存という観点から改めて解析し、望ましい運動パラメータの組合せの候補を検討する。これらのことから、上述の指針と小川らの報告で選択された形容詞対を考慮し、図4に示されるような形容詞対を選択した。

これらの形容詞対に対し、7段階の尺度で評価を行ってもらう。

(a) Following distance is 100 (mm)

(b) Following distance is 150 (mm)

Fig. 4 Mean value of evaluation

4. 実験結果

以上のような条件下で、健常な大学生男女 30 名 (18-24 歳, 男 15 名, 女 15 名) に対し心理評価を行った。評価結果の平均値のうち、追従距離 100 mm, 150 mm の場合の結果を図 4 に示す。なお、被験者は初めてこの実験を行っている。

図 4(a) より、追従距離 100 mm のとき、「機敏な-のろまな」「速い-遅い」の項目について、速度変化に伴って平均値が有意に大きくなっている (平均値の t 検定, 有意水準 5%)。また、「好き-嫌い」「感じのよい-感じの悪い」といった項目で、速度 200 mm/s の結果が他より有意に優れている (平均値の t 検定, 有意水準 5%)。そして、この傾向はほかのすべての追従距離においても同様にみられた。

図 4(b) を見ると、追従距離が 150 mm で速度が 200 mm/s の場合は、ほとんどすべての形容詞について評価が中央かあるいはよい評価の方に分布していることがわかる。このことから、このパラメータ値の組合せは、本報告で採用した制御則における望ましい候補の一つであるとともに、採用した制御則の有用性を示しているといえる。

なお、被験者の性別によって評価に違いがあらわれ

Table 2 Results of factor analysis

	Factor 1	Factor 2	Communality
快適な-不快な	0.81	0.16	0.686
感じの良い-感じの悪い	0.80	0.12	0.652
好き-嫌い	0.79	0.25	0.683
上品な-下品な	0.75	-0.33	0.663
気持ちよい-気持ち悪い	0.73	0.28	0.620
柔らかい-堅い	0.73	0.06	0.538
繊細な-あらう	0.70	-0.12	0.508
美しい-みにくい	0.66	0.35	0.555
滑らかな-ぎこちない	0.62	0.21	0.427
人間的-機械的	0.54	0.34	0.403
落ち着いた-うわついた	0.53	-0.47	0.504
速い-遅い	-0.02	0.87	0.764
活発な-不活発	0.07	0.87	0.757
機敏な-のろまな	0.00	0.81	0.658
軽快な-重々しい	0.29	0.72	0.611
飽きない-退屈な	0.32	0.70	0.588
動物的-植物的	0.14	0.63	0.419
面白い-つまらない	0.34	0.62	0.504
新鮮な-古くさい	0.43	0.60	0.546
力強い-弱々しい	-0.11	0.59	0.364
Percent of communality(%)	29.80	27.45	57.254

るかについて検討してみたが、有意な差はみられなかった(平均値の t 検定, 有意水準 5%)。

5. 因子分析および考察

実験を行い得られた 30 人分の心理評価の結果に対し、因子分析を行った結果を表 2 に示す。なお、分散共分散行列の固有値の中で 1 より大きいものが 2 個存在したので、因子数を 2 と決定した。また、因子数を 2 として主因子法を適用し、因子負荷量を求め、さらに各因子の解釈を容易にするため、バリマックス法による直交回転を行っている。

表 2 より、第 1 因子としては、“快適な-不快な”、“感じのよい-感じの悪い”、“気持ちのよい-気持ちの悪い”などの因子負荷量が多いことがわかる。よって、第 1 因子は人間の感情、特に「快さ」に対する因子であるといえる。また、図 5(a) は、追従距離が 150 mm のときの評価のうち、第 1 因子に属する形容詞対についての評価を示したものである。図 5 を見ると、200 mm/s の場合が最も優れていることや、定性的な分布が同様の傾向を示していることがわかる。次に、第 2 因子としては、“速い-遅い”、“活発な-不活発な”、“機敏な-のろまな”などの因子負荷量が多いことがわかる。よって、第 2 因子がロボットの動き、特に「速さ」に対する因子であると考えることができる。

(a) Factor 1

(b) Factor 2

Fig. 5 Mean value of evaluation ($d=150$ (mm))

(a) Results of $d=150$ mm, $v=100$ mm/s

(b) Results of $d=150$ mm, $v=200$ mm/s

(c) Results of $d=150$ mm, $v=300$ mm/s

(d) Results of $d=150$ mm, $v=400$ mm/s

Fig. 6 Score plots on first and second factor plane

また、図5(b)は、第2因子に属する形容詞対についての評価を示したものである。図5を見ると、速度の大きさと評価の値がほぼ比例しており、定性的な分布が近い傾向を示していることがわかる。以上のことから、回避運動を行うロボットにおいて、被験者はロボットの動きに対する「快さ」、ロボットの「速さ」に注目しているといえる。

小川ら⁽⁷⁾は、物体の動き(板の上下運動)に対する心理評価の結果に因子分析を施したところ、第1因子として「快さ」の因子、第2因子として「速さ」の因子、第3因子として「興味」の因子を得た。本報告においては「興味」に対する因子が強く現れていないが、これは、小川らの研究では物体の動きを客観的に観察したのに対し、本報告ではロボットと人間の相互作用による動きの観察を行っているという違いが現れているものと考えられる。

図6は、追従距離が150 mmの条件における結果を、第1因子(快さ)を横軸に、第2因子(速さ)を縦軸とし、被験者30人分の因子得点をプロットしたものである。図6中の点線は、全測定中80%の測定値が存在する信頼楕円を表している。

ロボットが人間に対し回避運動を行うとき、違和感を与えず、心理的に好ましい動きを生成する必要がある。この観点から、横軸(快さ)正方向に因子得点が存在することが望ましい。また、池浦ら⁽⁶⁾およびShibataら⁽⁹⁾の報告によれば、あまりに速すぎる動きは人間に対し恐怖感を抱かせるため、好ましくない。このため、横軸(快さ)の軸上に因子得点が存在すれば、速すぎず遅すぎず、ちょうどよい動きといえる。つまり、人間の接近に対し心地よい回避運動を行うためには、因子得点が第1、第4象限にまたがっているような動きであることが望ましいといえる。図6(a)は、因子得点が第4象限に多く分布している。つまり、心地よい動きではあるが、その動きが遅いと感じていることになる。図6(d)では、因子得点が第2象限に多く分布している。つまり、その動きが不快であり、また動きを速いと感じているといえる。図6(b)は、正の横軸上付近に因子得点がおもに分布している。このことから、心地よい、ちょうどよい速さの運動であることがわかる。そのほかのパラメータの場合についても検討した結果、図6(b)、つまり追従距離150 mm、タスク方向速度200 mm/sのときのロボットの運動がもっとも望ましい動きであるといえる。このことは逆に言うと、採用した制御則においてこれらの望ましいパラメータの値を用いることにより、人間心理に好ましい、適度な速さで快い感情を人に抱かせる動きが実

現可能であることを示している。

6. 結 言

人間と動作空間を共有するロボットが、人間の意図しない接近に対し回避運動を行う場合、衝突が起らないように運動することはもちろんのこと、人間心理に好ましい運動軌道を生成すべきである。本報告では、この観点から人間が接近した際のロボットの回避運動における制御則を考察し、回避運動の運動パラメータ値決定の指針、および回避運動が人に与える心理的影響を検討した。

まず、ロボットの人間回避運動の制御則として、人間の顔正面方向の運動を、人間の接近運動に一定の距離(追従距離)を置いて追従することにより回避する方法を採用した。次に、追従距離およびタスク方向速度という運動パラメータと回避運動に対する人間心理の関係をSD法を用いて解析した。その結果、人間心理に好ましい運動となる運動パラメータ値(本報告におけるロボットでは、追従距離150 mm、タスク方向速度200 mm/s)が存在することがわかった。また、そのときの心理評価の結果が多くの感情(形容詞対)に対して優れており、その他の感情についてもネガティブな値を示していないことから、採用した回避運動の制御則が有効であることがわかった。さらに、因子分析の結果、「速さ」および「快さ」の感情が回避運動に対する人間心理を代表するものであり、適度な速さで快い感情を抱く動きが採用した制御則により実現可能であることを示した。

本報告では、ロボットの動きの評価に重点を置いており、ロボットの形状や色といった外見的特徴は考慮していない。しかしながら、これらは人間心理に影響を及ぼす重要なファクタと考えられ、人間心理との関係解明について、今後取組んでいきたい。

文 献

- (1) Miyazaki, F. and Arimoto, S., Sensory feedback for robot manipulators, *Robotic Systems*, 2-1(1985), 53-72.
- (2) Oussama, K., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *Int. J. Robotics Research*, 5-1(1986), 90-98.
- (3) 原功・長田正, Configuration空間における障害物記述に関する考察, 日本ロボット学会誌, 11-2(1993), 255-262.
- (4) 李承宰・山下宏, 剛体マニピュレータの障害物回避のための最小エネルギー軌道設計に関する研究, 機論, 63-610, C(1997), 2030-2036.
- (5) 手嶋教之, 福祉ロボットにおける心理面からみた安全性(第1報)ーロボット速度・顔からの距離と恐怖心, 第10回ロボット学会学術講演会予稿集, (1992), 1107-1108.
- (6) 池浦良淳・大塚英樹・猪岡光, 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研究, 人間工学, 31-5

- (1995), 355-358.
- (7) 小川鑑一・森政弘・平井明樹夫・土屋謙一郎・湯原博光, ものの動きに関する感情分析, 人間工学, **25**-4(1989), 243-251.
- (8) 斉藤幸子, セマンティック・ディファレンシャル(SD)法, 人間工学, **14**-6(1978), 315-325.
- (9) Shibata, S. and Inooka, H., Psychological Evaluations of Robots Motions, *Int. J. Industrial Ergonomics*, **21** (1998), 483-494.
- (10) Flash, T. and Hogan, N., The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model, *J. Neurosciences*, **5**-7 (1985), 1688-1703.
-