

ロボットデザインと機能の関係と事象

Relationship and Phenomenon of Robot Design and Function

大塚 庄一郎¹ 小松 孝徳² 小山 浩幸³ 山本 紳一郎³

米田 隆志³ 植田 一博¹

Shoichiro Otsuka¹, Takanori Komatsu², Hiroyuki Koyama³, Shinichiro Yamamoto³

Takashi Komeda³, and Kazuhiro Ueda¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科

¹ Department of General System Studies, The University of Tokyo

² 信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点

² Fiber-Nanotech Young Researcher Empowerment Center, Shinshu University

³ 芝浦工業大学

³ Shibaura Institute of Technology

Abstract: This paper describes how to realize an appropriate robot design which enables to establish an intimate partnership between humans and robots. Unlike conventional robots utilized in industrial scene, the human-symbiosis robot requires space sharing and interaction between humans and robots, furthermore, the robot design is determined by considering static design and dynamic design. Here, the static design is about the appearance or configuration of the robot, and the dynamic design is about the trajectories, behaviors of the robot and achievement level of the given tasks. From this, the building of new robot design with affinity between robot and human is required. We used the Virtual Robot Model (VRM) prepared as 3-Dimensional Computer Graphics to assess the validity robot design. We used the psychology indicator and the physiological indicator as an evaluation method of this. As to the psychology indicator, we adopted the questionnaire, and the first impressions of robot were result taken from psychology indicator. And as to biological indicator, we adopted the heart rate variability and salivary amylase activity. This indicator was able to acquire the change of tension state of a human during an interaction. It was showed that the two indicators were effective in evaluation of robot design. The results showed that there is a necessity of adopting compliance between the dynamic design and static design.

1. はじめに

近年、我が国では急速に進展する少子高齢化が社会問題となっている。2005年度の人口動態統計の年間推計では、1899年の統計開始以来初めて、出生数が死亡数を下回った^[1]。そして、2025年には総人口に対する65歳以上の高齢者の割合が30%に達すると予測されている^[2]。その一方で、多様なライフスタイルから、個々の求めるものが異なっており、サービスも多様化している。

こうした少子高齢社会においても、現在の生活やサービスの質を維持するために、産業の場のみなら

ず日常生活や介護の場でもサービスを提供できるロボットの実現が期待され、既にいくつかのロボットが市販されている。このようなことから、近い将来、ロボットは今まで以上に身近な存在になることが予測される。

本研究では、ヒトとロボットが同じ動作空間上に存在した場合、ロボットデザインの違いが、ヒトに対しどのような影響を与え、また、どのような印象を与えるのかを測定し、検証を行う。

2.Virtual Robot Model

ロボットのデザインを検証するには、既存の工業製品で重視されるロボットのフォルムやカラー、素材感といった静的なデザイン要素などの「スタティックデザイン」と共に、動作軌道やその速度、動作音といったロボットが動作することで明らかになる動的なデザイン要素である「ダイナミックデザイン」の2つのデザイン要素が存在すると考えられる。

本研究では、これらの2つのデザイン要素を持つ3GCDによるVirtual Robot Model(以下VRM)を作成した。

VRMのベースは、三菱重工社製のホームロボット“wakamaru”^[3]と芝浦工業大学福祉ロボットシステム研究室で開発中の介助用モビルロボットシステム(AMOS: Assistive Mobile Robot System)^[4]、二足歩行のヒューマノイド型ロボットである。wakamaruのVRMは、ヒト型のハンドを持つものと、プレート型のハンドを持つものの2種類を作成した。AMOSのVRMは、2指型のハンドを持つものと、プレート型のハンドを持つものの2種類を作成した。また、ヒューマノイド型ロボットのVRMはヒト型のハンドを持つもののみを作成した[Fig.1]。



Fig.1 wakamaruのVRM[左端]・AMOSのVRM[中央]・ヒューマノイド型ロボットのVRM[右端]

3. [実験1]機能的デザイン評価実験

3.1 実験概要・手順

本実験は、実験参加者がVRMと仮想生活空間を共有しインタラクションを行った場合を想定して、VRMのスタティックデザインおよびダイナミックデザインの条件を統制し、各条件の違いが実験参加者の内部状態に与える影響を生理的指標および認知的指標から考察することで、スタティックデザインとダイナミックデザインの整合性、そして、人間との親和性を検討するものである。具体的には、スタティックデザインとして「機能的なデザイン、機能的でないデザイン」の2つの条件、ダイナミックデザインとして「与えられた作業を的確に遂行した場合、与えられた作業を失敗した場合」の2つの条件

という、合計4つのインタラクションに置かれた実験参加者から取得した、生理的指標および認知的指標にどのような差異がみられるかを観察した。本実験で使用されるVRMは3DCGで作成した仮想生活空間内に配置され、実験参加者の指示により食べ物の乗せられたトレーを実験参加者の近くまで運ぶ作業を行う。

このVRMにおいて、機能的なデザインとは、トレーを把持することが可能なヒト型ハンドおよび2指型ハンドを持つVRMのこと、一方、機能的でないデザインとは、トレーを把持することのできない、単純なプレート型ハンドを持つVRMのことである。そして、「与えられた作業を的確に遂行した場合」とは、VRMがトレーを落下することなく作業を終えた場合のこと、一方、「与えられた作業を失敗した場合」とは、VRMがトレーを途中で落下する場合のことである。また、本実験において、トレーを落下した場合でも、VRMは落下に気付かずに、最後までトレーを把持している場合と同様の動作を取る。

実験は恒温恒湿室(室温:23.0℃,湿度:30.0%)で行われ、実験参加者は実験開始30分前に入室し、平常状態に落ち着かせた後に実験を開始した。

まず、実験者はスタティックな状態(動作していない状態)のVRMを大型スクリーン(80Inch,ユーザからの距離1.5m)に投影しながら、以下のような実験の概要を説明する[Fig.2]。この際、スクリーンに投影されるものは、背景およびトレーなどを含まない、VRMのみの映像を使用する。そして、実験参加者に対し、下記の3点を説明し、投影されているVRMの第一印象についてのアンケート調査を行う。

- ・ 実験で使用するロボットは、現在スクリーンに投影されているVRMである。
- ・ 投影されているVRMには、物を運搬する作業を行わせる(具体的に何を運ばせるのかはここでは言及しない)。
- ・ 投影されているVRMは、実験参加者の音声によって動作する。

アンケート後、スクリーンに実験で使用する仮想生活空間を投影し、実験参加者に対し、下記4点の具体的な実験内容を説明し、VRMとのインタラクションを行う。このとき、生理的指標として心電測定および皮膚電気活動計測を行う。

- ・ VRMには奥のテーブルに置いてあるトレーを、手前のテーブルまで運搬させる。
- ・ VRMは右側からフレームインし、実験参加者の方を向いて止まり指示を待つ。
- ・ 実験参加者は、VRMに対して音声による指示を、1度だけ与えることができる。

- VRM がフレームアウトした時点で、実験は終了する。

インタラクション終了後、ダイナミックデザインを加味した、ロボットに対する印象についてのアンケートを行う。

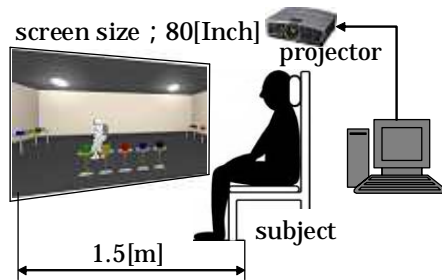


Fig.2 実験環境

3.2 実験参加者

実験には、40名の学生（男性22人、女性18人：平均年齢19.6歳）が参加した。本実験では、実験参加者が全て同一の判断傾向を持つと仮定し、これらの実験参加者は、5人ずつ Table.1 に示した8グループに無作為に分けた。

Table.1 各グループの実験条件

	ベース	ハンド形状	作業
W1	wakamaru	ヒト型	正確に遂行
W2	wakamaru	ヒト型	途中でトレーを落下
W3	wakamaru	プレート型	正確に遂行
W4	wakamaru	プレート型	途中でトレーを落下
A1	AMOS	2指型	正確に遂行
A2	AMOS	2指型	途中でトレーを落下
A3	AMOS	プレート型	正確に遂行
A4	AMOS	プレート型	途中でトレーを落下



Fig.3 実験1画面(W1条件)

3.3 実験結果

(1) 心拍変動

実験中の心電測定データから R-R 間隔を抽出し、

呼吸性変動 (RSA) および心拍性変動 (MWSA) の解析を行った。そして、MWSA が RSA よりも大きな値を示したとき、実験参加者が緊張状態にあるとみなし、緊張状態にあると考えられた時間 (MWSA 率: MWSA が RSA よりも大きな値にある時間の割合) を算出した^[5]。また、VRM とのインタラクション中に、ロボットがスクリーンにフェードインしてから、(W2/W4/A2/A4) 条件のロボットがトレーを落下するポイントを通るまでを実験前半 (約 60 秒) とし、ポイント通過からロボットがスクリーンをフェードアウトするまでを実験後半 (約 45 秒) とし、それぞれのフェーズにおける MWSA 率を算出した。その結果の平均値を Table.2 に示す。

Table.2 実験中の緊張状態にあった時間の割合の平均

	実験前半	実験後半	実験前後の変化
W1	42.2 %	35.4 %	-6.7 %
W2	40.0 %	58.2 %	18.2 %
W3	84.4 %	49.3 %	-35.1 %
W4	74.0 %	63.6 %	-10.4 %
A1	48.3 %	25.4 %	-22.9 %
A2	50.8 %	5.7 %	-45.1 %
A3	26.8 %	12.5 %	-14.3 %
A4	31.7 %	5.4 %	-26.3 %

W 群の実験結果を三要素混合計画 (第一要因: ハンド形状 (実験参加者間要因), 第二要因: 作業 (実験参加者間要因), 第三要因: 実験の前後半 (実験参加者内要因)) の分散分析を行った。結果、第二要因と第三要因の交互作用が有意で ($F(1,16) = 6.51, p < .05(*)$)、第一要因と第三要因の交互作用が有意であった ($F(1,16) = 6.18, p < .05(*)$)。そこで、各水準で単純主効果の分析を行った。第二要素は、第三要因 " 実験前半 " 水準において有意である。第三要因は、第二要因 " 正確に作業 " 水準において有意で、第一要因 " ヒト型 " 水準で優位であった。

A 群も W 群と同様に、実験結果を三要素混合計画の分散分析を行った。その結果、第三要因 (実験の前後半) の主効果が有意であった ($F(1,16) = 26.72, p < .01(**)$)。

(2) 皮膚電気活動

実験参加者から計測された皮膚電気活動計測データを積分変換し、トレー落下時の反応波形振幅を、ロボット登場時の反応波形振幅を 1 として算出したものの、実験参加者群間において、有意差は確認されなかった。また、実験参加者の多くは、ロボッ

ト登場時およびトレー落下時において、大きな反応を示さなかった。

(3) アンケート調査

インタラクション前後に行ったアンケート調査において、27項目の形容詞群(良い/かわいらしい/面白い/暖かい/近づきやすい/人間的/愉快/親しみやすい/好き/陽気/感じがよい/賢い/派手/敏感/充実/明るい/積極的/うちとけ易い/速い/すばやい/興味深い/思いやり/複雑/安全/わかりやすい/はげしい/強気)についての4段階尺度の評定(あてはまる/ややあてはまる/ややあてはまらない/あてはまらない)を、ポジティブな回答ほど値が高くなるように1点から4点を与えた。さらに、自由記述により外見および動作に関する回答を求めた。

まず、W群のハンド形状の違いと第一印象の関係を検証するため、27項目それぞれに一要因実験参加者間計画(要因:ハンド形状)の分散分析を行った。その結果、27項目の質問に対し有意差は見られなかった。次に、VRMとのインタラクション前に行ったアンケート調査とインタラクション後に行ったアンケート調査から、ロボットとインタラクションを行うことによる、ロボットに対する印象の変化を検証するため、27項目それぞれに二要因実験参加者間計画(第一要因:ハンド形状,第二要因:作業)の分散分析を行った。その結果、以下に示す4項目に交互作用が確認された。

- “感じがよい” (F(1,16) = 5.48, p<.05(*))
- “明るい” (F(1,16) = 4.76, p<.05(*))
- “はげしい” (F(1,16) = 4.97, p<.05(*))
- “強気” (F(1,16) = 10.45, p<.01(**))

そこで、各水準ごとに単純主効果の分析を行った。その結果、4項目いずれも、ハンド形状要因に対して作業要因の“作業に失敗”水準が有意であった。

- “感じがよい” (F(1,16) = 7.89, p<.05(*))
- “明るい” (F(1,16) = 3.76, p<.1(+))
- “はげしい” (F(1,16) = 3.38, p<.1(+))
- “強気” (F(1,16) = 5.23, p<.05(*))

そして、4項目いずれも、作業要因に対してハンド形状要因の“ヒト型ハンド”水準がそれぞれ有意であった。

- “感じがよい” (F(1,16) = 7.01, p<.05(*))
- “明るい” (F(1,16) = 3.56, p<.1(+))
- “はげしい” (F(1,16) = 6.76, p<.05(*))
- “強気” (F(1,16) = 6.32, p<.05(*))

次に、交互作用が確認されなかった項目で、ハンド形状要因に有意差が確認されたのは、以下に示す4項目であった。

- “良い” (F(1,16) = 3.84, p<.1(+))
- “面白い” (F(1,16) = 3.48 p<.1(+))
- “親しみやすい” (F(1,16) = 3.85, p<.1(+))
- “速い” (F(1,16) = 3.90 p<.1(+))

そして、作業要因に有意差が確認されたのは、以下に示す5項目であった。

- “愉快” (F(1,16) = 8.48 p<.05(*))
- “親しみやすい” (F(1,16) = 5.54, p<.05(*))
- “賢い” (F(1,16) = 6.94, p<.05(*))
- “思いやり” (F(1,16) = 5.00, p<.05(*))
- “安全” (F(1,16) = 16.00, p<.01(**))

交互作用が認められた4項目は、特にロボットから感じる感情を評価する項目であった。“感じがよい”と“明るい”の親近感を問う項目では、インタラクション後にヒト型ハンドの印象が下がり、“はげしい”と“強気”の攻撃性を問う項目では、インタラクション後にヒト型ハンドの印象が上がった。すなわち、ヒト型ハンドのVRMが作業を失敗した場合の方が、プレート型ハンドが作業を失敗した場合と比べ、親近感を失い攻撃的に感じられると考えられた。また、実験1と同様に、“賢い”や“安全”といった、実験参加者にとって評価しやすい項目は、作業を失敗した場合に大きくスコアが低下していた。

A群もW群と同様に、ハンド形状の違いと第一印象の関係を検証した。その結果、27項目全ての質問に対し有意差は見られなかった。次に、VRMとのインタラクション前に行ったアンケート調査とインタラクション後に行ったアンケート調査を比較することで、ロボットとインタラクションを行ったことにより、ロボットに対する印象がどのように変化したのかを検証するため、27項目それぞれに二要因実験参加者間計画(第一要因:ハンド形状,第二要因:作業)の分散分析を行った。その結果、いずれの項目に対しても交互作用は見られなかった。そのうち、ハンド形状要因に有意差が見られた項目は、“すばやい”(F(1,16) = 3.71, p<.1(+))の1項目であった。そして、作業要因に有意差が見られた項目は、以下の8項目であった。

- “良い” (F(1,16) = 3.88, p<.1(+))
- “暖かい” (F(1,16) = 3.18, p<.1(+))
- “近づきやすい”(F(1,16) = 4.50 p<.05(*))
- “賢い” (F(1,16) = 6.89, p<.05(*))
- “充実” (F(1,16) = 6.05, p<.05(*))
- “明るい” (F(1,16) = 6.05, p<.05(*))
- “思いやり” (F(1,16) = 3.31, p<.1(+))
- “安全” (F(1,16) = 7.50, p<.05(*))

ここから、インタラクションを行うことによるAMOSに対する印象の変化は、ハンド形状に関係なく、作業に成功した場合は印象が改善することが解

った。また，“賢い”や“安全”といった，実験参加者にとって評価しやすい項目は，作業を失敗した場合に大きくスコアが低下している。

3.4 考察

wakamaru の VRM では，認知的指標におけるロボットの第一印象では，ハンド形状による印象の有意差は見られなかった。一方，心拍変動解析ではハンド形状の違いに緊張状態の有意差が認められた。これは，実験の中で，与えられたタスク達成に必要なロボットのスキルには疑問を持たないが，潜在的にロボットに対し，違和感を持ちながらインタラクションを行ったためと考えられた。つまり実験参加者は，プレート型ハンドのロボットに対し，無意識的に不安を感じていたと言えた。また，ヒト型ハンドのロボットがトレーを落下した後に実験参加者の緊張状態が増加するのは，タスクの成功を見込んでいたロボットが，タスクを失敗したことに対する驚きや，その後の動作に対する不安感と考えられた。一方，プレート型ハンドのロボットがトレーを落下した後，実験参加者の緊張状態は増加しなかった。これは，ロボットのタスク成功に疑問を持っていた実験参加者が，想像通りの失敗に対する諦めの結果であると考えられた。

4. [実験 2]人間-ロボット間における獲得損失効果検証実験

4.1 実験概要・手順

実験 1「機能的デザイン評価実験」に続き，人間-ロボット間における獲得損失効果の検証を目的とした実験を実施した。

まず，実験者はスタティックな状態（動作していない状態）の VRM を大型スクリーン（80 Inch，ユーザからの距離 1.5 m）に投影しながら，以下のような実験の概要を説明する。この際，スクリーンに投影されるものは，背景およびトレーなどを含まない，VRM のみの映像を使用する。そして，実験参加者に対し，下記の 3 点を説明し，投影されている VRM の第一印象についてのアンケート調査を行う。

- ・ 実験で使用するロボットは，現在スクリーンに投影されている VRM である。
- ・ 投影されている VRM には，物を運搬する作業を行わせる（具体的に何を運ばせるのかはここでは言及しない）。
- ・ 投影されている VRM は，実験参加者の音声に

よって動作する。

アンケート後，スクリーンに実験で使用する仮想生活空間を投影し，実験参加者に対し，下記 4 点の具体的な実験内容を説明し，VRM とのインタラクションを行う。このとき，生理的指標として唾液アミラーゼ活性計測を行う。

- ・ VRM には奥のテーブルに置いてあるカラーボックスを，手前のテーブルまで運搬させる。
- ・ VRM はテーブルの前で，実験参加者の方を向いて止まり指示を待つ。
- ・ 実験参加者は 1 度の作業で，VRM に対して音声による指示を，1 度だけ与えることができる。
- ・ 上記を 5 回繰り返し実行する。

インタラクション終了後，ダイナミックデザインを加味した，ロボットに対する印象についてのアンケートを行う。

4.2 実験参加者

実験には，33 名の学生（男性 22 人，女性 11 人：平均年齢 18.5 歳）が参加した。本実験では，実験参加者が全て同一の判断傾向を持つと仮定し，これらの実験参加者は，Table.3 に示した 4 グループに無作為に分けた。

Table.3 各グループの実験条件

	ベース	作業	実験参加者数
Hs	ヒューマノイド型ロボット	正確に遂行	9
Hm	ヒューマノイド型ロボット	作業を失敗	8
As	AMOS (2 指型ハンド)	正確に遂行	8
Am	AMOS (2 指型ハンド)	作業を失敗	8

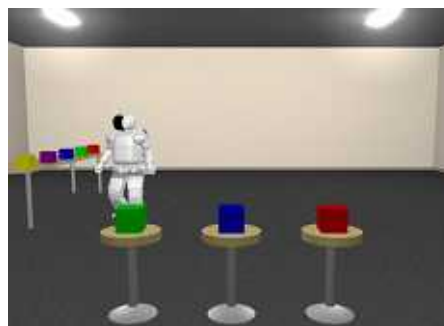


Fig.4 実験 2 画面

4.3 実験結果

(1) 唾液アミラーゼ活性

唾液アミラーゼ活性について，安静時とインタラクション後に測定し，測定値を比較した。ここで，

安静時と比較し、活性の値が大きくなった場合、実験参加者が実験によりストレスを感じたものとみなす^[6]。Fig. 5 (a) に実験結果を示す。唾液アミラーゼ活性では分散分析の結果からは有意差は見られなかったが、Am 条件でストレスが大きくなる傾向が見られた。

(2) アンケート調査

アンケート項目は下記の 8 項目で、数値が高いほど評価が高い 10 段階評価で行った。Fig. 5 (b), (c) はそれぞれインタラクション前と後の結果である。これらを分散分析により検定した。(b)について、Q1, 3, 4, 7 で AMOS よりもヒューマノイド型ロボットの評価が高かった。(c)については、Q1, 2, 4 において AMOS よりヒューマノイド型ロボットの評価が高かった。また、Q2, 3, 5, 6, 7, 8 で成功条件が失敗条件より評価が高かった。さらにインタラクション前後の変化を調べると、Q2, 3, 6, 7, 8 において成功すると評価が上昇し、失敗すると下降した。Q5 は失敗すると下降した。

Q1:親しみやすいと感じた	Q5:作業を成功しそうだと思う
Q2:このロボットを欲しいと思う	Q6:作業を任せられると思う
Q3:良い印象を持った	Q7:賢いと思う
Q4:打ち解けた印象を持った	Q8:知性的だと思う

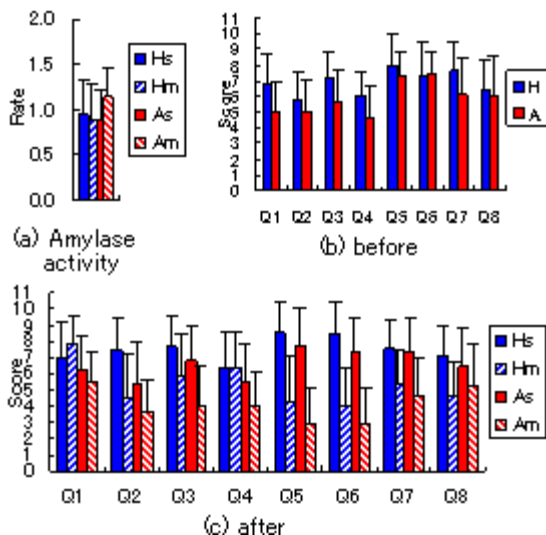


Fig.5 実験 2 結果

4.4 考察

獲得損失効果が起こるならば、Hs 条件より As 条件の評価が高く、Am 条件より Hm 条件の評価が低くなる。しかし、実験結果からはこのような現象は起きず、人間-ロボット間の獲得損失効果を見ることはできなかった。原因として、今回のインタラクションでは実験参加者がただロボットを見ている時間

が長かった事と、単調なインタラクションが続き実験に飽きてしまい、十分な印象付けができなかった事が考えられる。

5. おわりに

本研究により、ロボットとインタラクションを評価する際には、スタティックデザインとダイナミックデザインを評価することの必要性が示唆された。そして、ヒトはロボットの第一印象から、ロボットの機能について無意識的に推定していると考えられる。また、評価においては、生理的指標と認知的指標を組み合わせることにより、ユーザの印象を正確にとらえることができると考えられる。

今後は、ヒトがロボットデザインのどの要素から、機能を推定しているのかを特定し、ヒトにとって「親和性のあるロボットデザイン」がどのようなものかを追及していきたい。

参考文献

- [1] 厚生労働省大臣官房統計情報部:平成 17 年人口動態統計の年間推計 (2005)
- [2] 国立社会保障・人口問題研究所:日本の将来推計人口 (2006)
- [3] <http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/>
- [4] Takahashi, Y., Komeda, T., Koyama, H.: Development of the assistive mobile robot system AMOS-to aid in the daily life of the physically handicapped; *Advanced Robotics*, Vol.18, No.5, pp.473-496 (2004).
- [5] Komatsu, T., Ohtsuka, S., Ueda, K., Komeda, T., and Oka, N.: A method for estimating whether a user is in smooth communication with an interactive agent in human-agent interaction, In *Proceedings of the 8th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems*, KES2004, pp. 371-377 (2004).
- [6] 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 水野康文, 吉田博: 唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか, *医用電子と生体工学*, Vol.39, No.3 (2001) 234-239