

視線コミュニケーションのためのロボットの視線表現

2016年9月

埼玉大学大学院理工学研究科(博士後期課程)

理工学専攻(主指導教員 久野 義徳)

小貫 朋実

概要

近年，人間とコミュニケーションを行い，人間と共に暮らすことを目的としているコミュニケーションロボットが増えてきた．コミュニケーションは大きく分けて言語コミュニケーションと非言語コミュニケーションに分けることができ，自然なコミュニケーションを行うにはコミュニケーションロボットにも非言語コミュニケーションが行えることが求められる．非言語コミュニケーションの中で，本研究では視線を用いたコミュニケーションに着目した．人間とロボットのインタラクションにおいて，会話の進行において視線のやり取りの重要性，視線を相手に見せる機能の重要性は様々な研究で指摘されている．

ロボットによる視線を用いたコミュニケーションを行うには，ロボットの視線方向を人間に感じてもらう必要がある．また，人間と日常生活で共生するロボットにおいては，機能的価値だけでなく，情緒的価値も重要であり，外見的にも人間が受け入れられるものでなければならない．そのため，外見上の親しみやすさも重要である．そして，ロボットが何かを『見ている』ということを見た目や動作を用いて人間に印象付ける必要がある．第1章にて，本研究の背景，関連研究，目的と課題，構成について詳しく述べる．

本研究では視線コミュニケーションを行なうために，目の外見のような静的な視線表現と眼球動作のような動的な視線表現について考える．

静的な視線表現として，親しみやすさと視線の読み取りやすさを兼ね備えた目のデザインと，視線の読み取りやすい顔のデザインについて考えた．

第2章にて人間の目を基準として，目の縦幅及び黒目の大きさを変え計9タイプの目のデザイン候補を作り，親しみやすさの調査を行った．被験者は日本人と英語を母国語とする留学生の2グループで行った．その結果，親しみやすい目のデザインは，2グループとも目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じ，またはそれ以上に縦幅があり，露出している黒目と白目の面積の比率が同じか黒目の方がより大きい目が良いという結果となった．

第3章では，第2章で作成した目のデザイン候補を用いて視線の読み取りやすさ

の調査を行った。その結果、黒目の大きさで有意差が見られ、露出している黒目と白目の面積の比率が同じか黒目の方がより大きい目が視線が読み取りやすくなる傾向があった。目の動きを見せることで視線方向を読み取る精度が上がることも同時に確認した。平面の顔・半球の顔・人間でいう鼻にあたる三角形の突起を半球の中央につけた顔の3つをつくり、視線の読み取りやすさについて調査を行ったところ、三角形の突起を半球の中央につけた顔が最も視線が読み取りやすい顔となった。

親しみやすさと視線の読み取りやすさを兼ね備えた目のデザインは、目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じ、またはそれ以上に縦幅があり、露出している黒目と白目の面積の比率が同じか黒目の方がより大きいものが良いと思われる。また、目を動かすとより視線が読み取りやすくなること、顔の中央、鼻に当たる位置に凹凸をつけると読み取りやすさが上がるのが分かった。

動的な視線表現として、全体としての視線の自然な動作、目によるロボットの内部状態表現が考えた。

第4章では、視線の自然な動作を調査するために人間の動作を観察し、その中から要素を抽出してそれを元に眼球動作と頭部動作、そしてその2つの連動について検討した。人間の視線配布動作を観察したところ、頭部回転をするときに瞬きをすること、頭部回転は加速し減速するという速度変化をすることが分かった。速度変化を行うロボットの振り向き動作の印象評価を行ったところ、加速減速を伴う首振りには好感、振り向いた感、見られた感、自然さ、親しみやすさがあることが分かった。そして、速度変化のある頭部回転と、頭部回転を行う際に瞬きをし、眼球回転角度と頭部回転角度を組み合わせて対象物を見る動作を作成したところ、自然であるという印象を与えることができた。

第5章では、視線による内部状態の表現について調査を行った。集中して物に視線を定めている状態に行われる注視動作と、そうではない状態に行われる待機動作の2つの動作に差を出すことで、ロボットの注視を演出することを考えた。ロボットに待機動作から注視動作へ移る様子を被験者に見せたところ、Saliencyの高い場所に反応する待機動作から注視動作へ移った動作を見た被験者は、ロボットの注視対象物へ視線を向けるという傾向が見られた。より自然な待機動作を人間の動作を元に作成するため、人を待つという状況における人間の視線動作の観察を行った。そうしたところ、被験者は視線が戻る位置がある状態で周囲を観察するような動作を行い、時間が経つにつれ遠くを見るようになった。観察した動作を元にロボットの待機動作を作成し、それと同時に視線がまったく動かない注視動作、さらに集中時の瞬きと非集中時の瞬きを想定した2つの量の瞬きを組み合わせ、ロボットの注視動作と待機動作の印象評価を行った。その結果、注視動作としては瞬きが少な

く目が動かない，待機動作としては目が動く方が良いことが分かった．

第6章では，ロボットの視線表現のまとめと将来の展望について記述した．

目次

概要	i
図目次	x
表目次	xii
第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 関連研究	2
1.2.1 視線コミュニケーション	2
1.2.2 静的な視線表現	3
1.2.3 動的な視線表現	4
1.3 本研究の目的と課題	5
1.4 本論文の構成	7
第2章 目の形状による親しみやすさ評価	8
2.1 ロボットの目のデザイン候補	8
2.2 日本人による親しみやすさの評価実験	8
2.2.1 実験方法	8
2.2.2 実験結果	9
2.2.3 考察	10

2.3	英語を母国語とする留学生による親しみやすさの評価実験	12
2.3.1	実験方法	12
2.3.2	実験結果	13
2.3.3	考察	14
第3章	視線の読み取りやすさの評価	16
3.1	ロボットの構成	16
3.1.1	ロボットの機構	16
3.1.2	眼球投影	18
3.1.3	視線制御のための実世界観測	21
3.2	視線方向読み取り易さの評価	21
3.2.1	実験方法	22
3.2.2	実験結果	23
3.2.3	考察	25
3.3	眼球動作の有無による視線方向読み取り実験	26
3.3.1	実験方法	26
3.3.2	実験結果	27
3.3.3	考察	27
3.4	頭部回転を用いたロボットの顔の違いによる視線方向読み取り易さ の評価	30
3.4.1	ロボットの顔のデザイン	30
3.4.2	実験方法	31
3.4.3	実験結果	31
3.4.4	考察	33
第4章	視線の自然な動作	34

4.1	プロジェクトの目と機械の目の比較	34
4.1.1	実験方法	34
4.1.2	結果と考察	35
4.2	人間の注視行動の観察	37
4.2.1	実験方法	37
4.2.2	結果と考察	37
4.3	ロボットの振り向き印象評価	38
4.3.1	印象評価方法	38
4.3.2	評価結果と考察	41
4.4	頭と目の振り向き動作の自然さ評価	41
4.4.1	実験方法	42
4.4.2	結果と考察	43
4.5	視線コミュニケーションに適したロボットの頭	43
第5章	視線による内部状態の表現	45
5.1	ロボットの動的な視線表現	45
5.2	自然な待機動作の評価実験	45
5.2.1	実験方法	45
5.2.2	結果と考察	46
5.3	人間の待機動作観察実験	47
5.3.1	実験方法	47
5.3.2	実験結果	49
5.3.3	考察	52
5.4	目の動作による表現	52
5.4.1	実験方法	52

5.4.2	結果と考察	53
第6章	結論	56
6.1	ロボットの視線表現のまとめ	56
6.2	将来の展望	59
	謝辞	61
	参考文献	62

目 次

2.1	目の縦幅と黒目の大きさを変化させ作ったロボットの目のデザイン候補	9
2.2	一対比較を用いた親しみやすさの印象評価 (日本語)	10
2.3	サーストンの一対比較を用いた親しみやすさの印象評価結果グラフ (日本人)	10
2.4	一対比較を用いた親しみやすさの印象評価 (英語)	12
2.5	サーストンの一対比較を用いた親しみやすさの印象評価結果グラフ (留学生)	14
3.1	使用したロボット	16
3.2	図 3.1 のマスクを外した状態	16
3.3	SHOWWX+ (Micro Vision Inc.)	17
3.4	CG の目の投影方法	18
3.5	半球スクリーン (日立製 LED 電球のカバー)	19
3.6	歪んだ半球スクリーン	19
3.7	半球スクリーンと歪んだ半球スクリーンの視線読み取り平均誤差の比較	19
3.8	ロボットの顔表現	20
3.9	(左) 虹彩と瞳孔のある黒目のモデル, (右) 表面反射を表現したビデオテクスチャを映した眼球	20
3.10	カメラを用いた視線方向の制御	21

3.11	視線方向読み取り実験の実験風景	22
3.12	視線方向読み取り実験中の被験者から見るロボットの状態	23
3.13	視線方向読み取り平均誤差グラフ (平均誤差の小さい順)	24
3.14	マーカごとの平均誤差	26
3.15	眼球動作の有無による平均誤差比較グラフ	28
3.16	眼球動作がある場合でのマーカごとの平均誤差	29
3.17	平面の顔	31
3.18	半球の顔	31
3.19	半球+鼻の顔	31
3.20	顔の形状の違いによる平均誤差比較グラフ	32
4.1	Robovie-R Ver.3 : (左) 機械の目, (右)CG の目	35
4.2	機械の目と CG の目の印象評価結果	36
4.3	首振り動作観察風景	37
4.4	(左) 被験者正面に置かれたカメラからの画像, (右) 縦を速度, 横を時間とした場合での加速度センサによる計測結果のグラフ	38
4.5	首振りの傾向	39
4.6	ロボットの振り向き印象評価の様子	40
4.7	ロボットの振り向き速度グラフ	40
4.8	ロボットの振り向き印象評価結果	41
4.9	頭と目の振り向き動作評価実験のセッティング	42
4.10	提案するロボットの頭部	44
5.1	ロボットを基点とした実験環境風景	46
5.2	人間の待機動作観察実験環境	48
5.3	実験室のパノラマ画像	48

5.4	視線計測装置から得られる画像	49
5.5	帰着点の消失	50
5.6	時間経過により視線を送る距離が変化する様子	51
5.7	文字を読んでいる被験者の様子	51
5.8	動画を用いたアンケートを行なう Web システム	53
5.9	サー斯顿の対比較を用いた待機動作の印象評価結果グラフ . . .	54

表 目 次

2.1	日本人学生による一対比較集計結果	11
2.2	サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (日本人) . .	11
2.3	サーストンの一対比較法 case III モデルにより算出した尺度値 (日本人) 人)	11
2.4	露出部における白目に対する黒目の面積比	11
2.5	留学生による親しみやすさ評価の集計結果	13
2.6	サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (留学生) . .	13
2.7	サーストンの一対比較法 case III モデルにより算出した尺度値 (留学生) 生)	14
3.1	SHOWWX+ の主な仕様	17
3.2	ロボットの目ごとの視線方向読み取り平均誤差	23
3.3	視線読み取り平均誤差の分散分析 (静止)	24
3.4	ホルム法による多重比較	25
3.5	マーカごとの角度と平均誤差及び標準偏差	25
3.6	眼球動作の有無による平均誤差と標準偏差の比較表	27
3.7	視線読み取り平均誤差の分散分析 (動作)	29
3.8	マーカごとの角度と平均誤差及び標準偏差	30
3.9	顔の形状の違いによる平均誤差と標準偏差	32
3.10	顔の形状の違いによる視線読み取り結果の分散分析	32
3.11	顔の形状の違いによる視線読み取り結果のホルム法による多重比較	33

4.1	機械の目とCGの目の印象評価符号検定結果	36
4.2	ロボットの振り向き印象評価の符号検定結果	41
4.3	頭と目の振り向き動作の自然さ結果と t 検定の結果	43
5.1	眼球動作と瞬きの組み合わせによる一対比較集計結果 (注視動作) . .	54
5.2	眼球動作と瞬きの組み合わせによる一対比較集計結果 (待機動作) . .	55
5.3	サーストンの一対比較法 case V モデルにより算出した尺度値 (待機動作)	55
5.4	サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (待機動作) .	55

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年，Robovie[15] や PaPeRo[3]，パロ [36] といった人間とコミュニケーションを行い，人間と共に暮らすことを目的としているコミュニケーションロボットが増えてきた．これらのコミュニケーションロボットの活躍が期待されている場所は，美術館のガイドのように多くの人間と関わることから，介護や育児のように人間と密接に関わることまで多岐にわたっている．どんな場所であれ，その名が示す通りコミュニケーションロボットには人間とコミュニケーションをとることを求められている．コミュニケーションロボットは人間に受け入れられる存在でなければならない．コミュニケーションロボットが人間に受け入れられるためには，人間同士が行うコミュニケーションに等しい自然なコミュニケーションが人間・ロボット間で行えるようにする必要がある．

コミュニケーションは大きく分けて言語コミュニケーションと非言語コミュニケーションに分けることができる．非言語コミュニケーションには身振りや対人距離などがあり，感情的伝達，無意図的で自動的な行為であることが少なくないとされる[31]．そのため，異なる言語を用いる者同士での情報伝達効率が低くなる言語コミュニケーションに比べると，非言語コミュニケーションの方がメッセージを伝える相手を限定しにくい．よってコミュニケーションロボットは非言語コミュニケーションが行える必要である．そのような非言語コミュニケーションの重要なものの一つとして視線を合わせるアイコンタクトや相手と同じ物を見る共同注視など目を用いたコミュニケーションがある．

1.2 関連研究

1.2.1 視線コミュニケーション

視線コミュニケーションは様々な分野で研究されている。

形態学では，Kobayashi と Kohshima は，霊長類の目の形状を調査し，ヒトの目が最も横長で強膜（白目）が多く露出しており，ヒトのみが強膜に色素がないことを明らかにしている [8]．他の霊長類の強膜の色が角膜または肌の色と近い理由については，群で生活する中で「相手個体を見ている」という威嚇シグナルを発しにくくすることで争いを防ぐ，被捕食者が捕食者に対して「捕食者を知覚した」というシグナルを送り捕食されることを防ぐ等様々な説を提示している ([23] 第 2 章) が，共通して「視線方向を読み取らせない」という考えに立っている．逆を言えば，人間の様に強膜と角膜および肌の色に差がある目は「視線方向が読み取りやすい」と考えられる．

社会学では，会話の進行において，視線のやり取りが重要であることは古くから知られている [7]．

視線コミュニケーションでは，眼球運動だけではなく瞬きもまた重要な要素となる．緊張や興味，集中の度合いなどの精神状態によって瞬目の量が変わることは報告されている [32][24]．それと同様に，心理学では，瞬目の量による印象について次のようなことが報告されている．

大森らによると，瞬目の量が異なる 2 つの瞬目条件と，性別の異なる 2 人の話し手を組み合わせた 4 パターンから，1 人の話し手が登場する約 1 分間のビデオを作成し被験者に見せる実験を行ったところ，瞬目の多い話し手は瞬目の少ない話し手に比べ否定的に評定されることを示した [25]．

小孫は「男性でまばたきをよくする人」「女性でまばたきをよくする人」「男性でまばたきをあまりしない人」「女性でまばたきをあまりしない人」といった文章によってイメージされる人物の印象を調査したところ，男女とも瞬目の多い人は，全体的に情緒安定性に欠けている人であると思込まれていることを示している [27]．

瞬目も対人関係において相手の状態を読み取る，視線コミュニケーションの重要な要素の 1 つである．

工学の分野でも視線を相手に見せる機能の人間とロボットのインタラクションにおける重要性は Sidner[17] らや Mutlu[14] らの研究でも示されている．他にも発達行動学や発達心理学，生理学 [23] など様々な学問で視線コミュニケーションの重要

性が示されている。

これら視線コミュニケーションは大きく、目の外見といった静的な視線表現についての研究、目の動かし方といった動的な視線表現についての研究に分けて考えることができる。上記で示した Kobayashi と Kohshima[8] の研究は静的な視線表現の研究と言える。そこで次節から静的な視線表現と動的な視線表現に分け、目や視線、および視線コミュニケーションについての研究を紹介する。

1.2.2 静的な視線表現

顔の中の目としては次のようなことが分かっている。

ロボットの視線の読み取りについては、顔の形状により視線の読み取りやすさに違いが出るのかという実験を Delaunay 等が行っている [4]。これは、実際の人間の顔、実際の人間の顔を平面スクリーンに投影した顔、抽象化された顔のアニメーションを半球に投影した顔、抽象化された顔のアニメーションを人間の顔の凹凸を模したマスクに投影した顔の四つを用いて実験を行っている。彼らによると、平面や半球に映した顔は視線方向が読み取り難く、人の顔の形状を模したディスプレイでは、視線方向が読み取りやすいとされている。

Misawa らは、人間の顔型立体スクリーンに、実際の人間の顔を投影するテレプレゼンシステムを作成し、人間による表情知覚および視線方向知覚における顔型立体スクリーンの優位性を示している [12]。

視線の検知としては、Ando[1] が、人は視線を読み取る際、その目領域内の明度差の分布を手掛かりとしていることを示している。例えば、正面を見ている人物の写真において、両目領域内の角膜の右側の強膜の輝度を下げると、右側を見ているように知覚する。この現象は、目領域の外側まで影を落としたように輝度を下げた場合では、顕著には現れない。

視線方向知覚の検討を行った室、佐藤は、CG の顔を用いて行った視線方向知覚実験により、「視線方向の過大評価」と「顔の回転効果」は瞼が存在するためだということを示した [38]。「視線方向の過大評価」とは目が外側を向いていればいるほど、視線を読み取る側はより外側を見ていると知覚すること、「顔の回転効果」は、顔の回転方向とは逆方向に視線の補正がかかることである。実験は液晶シャッタ眼鏡を用いた立体視によって行われ、実物を用いた調査は行われていない。

このように視線の読み取りやすさの調査や、エージェントを使った視線コミュニ

ケーションの有用性が調査されている。しかし、目や顔のデザインはデザイナーや開発者にまかされており、体系だった目や顔のデザインの調査は行われていない。

コミュニケーションのためのデザインの研究もなされている。

Mori はロボットの外観に対して「不気味の谷」現象を提唱した [13]。これは、ロボットの外観を人間に似せていくと親しみやすさが増すが、ある点を超えると逆に人間との小さな差異が際立ち親しみやすさを感じにくくなるという現象である。Mori はレポートの中で不気味の谷に陥る手前のデザインを目指すべきであると提案している。

ロボットは動的で能動的であるため、人のロボットに対する情報量は五感から脳に移行する過程で急増する。そのため、中川 [34] は人が情報処理した結果をポジティブに変えていくデザインが、ロボットには必要であると述べている。[34] の中で人型ロボットのデザインで目は重要なものであるとも述べている。

自然な振る舞いは好ましい印象をあたえる、外観と振る舞いの一貫性が重要であることを Blow らは述べている [2]。また、[2] の中で抽象化された顔になると自己投影がしやすくなる可能性についても述べている。

他にも、人間と日常生活で共生するロボットにおいては、機能的価値だけでなく、情緒的価値も重要であり、外見的にも人間が受け入れられるものでなければならぬと言われている [30]。

このことからコミュニケーションにおいて親しみやすいデザインをした目が必要である。

1.2.3 動的な視線表現

目と頭の動作関係としては Doshi らによると人間は予期していない刺激に対しては目が先に動きだしそれに頭部回転が追従する形で振り向きを行なう。視線の移動先が分かっている場合は頭部回転が先に動き目が追従する [5]。

また、畑田の調査による視野の機能分布によると、頭部運動を誘発しないで見る範囲は注視対象物が水平方向 $\pm 15^\circ$ 以内である [35]。

眼球動作と頭部回転を組み合わせた場合頭部回転の比率を大きくした方が視線を読み取りやすくなるが、人間は眼球動作と頭部回転を組み合わせで見ているためロボットへ実装する際は動作比率を半々にすると良いのではないかという提案がなされている [9]。

このように，人間またはロボットの視線配布に関わる動作の調査はなされている．しかし，実際の人間の動作を基にした視線配布に関わる動作のロボットへの実装および調査は少ない．

ロボットの視線によるコミュニケーションへの影響としては，力石らが，アンドロイドの周りにある物体，特に，新たに出現したり，移動したりした物体を注視する待機動作を作成し，評価を行ったところ，視線を全く動かさない待機動作や視覚情報に対して反応を示さない待機動作と比較し，より自然な待機動作となることを示している [33] ．

Yamazaki 等によると，絵画を説明するようなガイドロボットにおいて，説明の中で興味深い点でオブジェクトへ視線を向けると，ガイドを聞く人をより説明に引き込むことができる [22] ．

2 種類の形の異なるそれぞれのロボットに加速度 3 段階，曲率 3 段階の組み合わせ計 9 個の動作を作りその印象評価を行った結果，見た目よりも加速度の方が人間に与える印象にとって重要であることを Saerbeck らが示している [16] ．

他にも，視線を相手に見せる機能の人間とロボットのインタラクションにおける重要性が Sidner ら [17] や Mutlu ら [14] の研究でも示されている．

これらの実験は，人間またはロボットがすでに何かを「見ている」とい前提で行われているが，実際の間人は常に何かをしっかりと見ているわけではない．また，ロボットが注視しているのかどうかを評価したものは少ない．

1.3 本研究の目的と課題

前節で示したように，視線コミュニケーションは人間にとって重要なものであり，目および視線がコミュニケーションロボットにも必要である．そこで本研究では，ロボットに視線コミュニケーションを行わせることができる目のデザインや振る舞いといった視線表現について考えることにする．

現在，コミュニケーションロボットの目には次のような課題がある．

まず静的な視線表現の課題としては，「視線の読み取りやすさ」および「コミュニケーションの相手としての親しみやすさ」について体系だった目のデザインの調査がされていないことがあげられる．これまでに，コミュニケーション用のロボットが多く開発されているが，どういうデザインにするかは開発者またはデザイナーが決めている．視線コミュニケーションと外見の与える印象の 2 つの観点から目の

形状のデザインを研究したものはない。

視線コミュニケーションの観点からは、当然視線が読み取りやすい目のデザインがよいと考えられる。プロジェクションによる顔で、視線の読み取りやすさを検討した研究はあるが、目の形状と視線の読み取りやすさの関係については調べられていない。また、目だけではなく顔の形状の要素についても検討の余地がある。

外見の印象は目的によりどのような印象を与えるのがよいか異なるし、感覚的なものは個人により異なり、単純に特定のものがよいとは言えないだろう。しかし、身の回りでサービスをしてくれるロボットでは、ロボットの専門家ではない人間がロボットにサービスを頼むので、気軽に仕事を頼めるよう親しみやすいという印象を一般的に与えるものがよいと考えられる。

本研究は静的なデザインとして、親しみやすさと視線の読み取りやすさを兼ね備えた目のデザインおよび視線の読み取りやすい顔の形状を検討する。この際、目のデザインは Mori の発表を踏まえ、不気味の谷に陥る手前、人間に近付けつつもロボットらしさを持ったままとする。

次に動的な視線表現の課題としては、人間の視線配布に関わる動作のロボットへの実装および調査の少なさ、および、ロボットが注視しているのかを評価したものの少なさの2点があげられる。

人間の視線配布に関わる動作をロボットへの実装する方法の中に人間の動作をモーションキャプチャにより完全にトレースする方法がある。しかし、それでは人間と同じ駆動システムをロボットが持つ必要が出てしまう。それでは実装するロボットが限定されてしまう。そこで主に人間が視線配布につかう眼球および頭部の動作に限定し、特徴的な動作を抽出すると、実装するロボットを限定しにくくすると考えられる。

ロボットが注視しているのかを評価したものが少ない理由としては、注視状態の表現、および、注視状態の評価が難しいことがあげられる。ロボットが注視しているのかを評価するためには、まず注視を行うような内部状態にロボットがなっていることを表現する方法を考えなければならない。

そこで本研究では動的なデザインとして、眼球動作と頭部動作を組み合わせた視線の自然な動作、眼球動作によるロボットの内部状態表現を行うことを検討する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである．

第1章 序論

第2章 目の形状による親しみやすさ評価

第3章 視線の読み取りやすさの評価

第4章 視線の自然な動作

第5章 視線による内部状態の表現

第6章 結論

静的な視線表現については第2章および第3章で，動的な視線表現については第4章および第5章に記述する．ロボットの視線表現のまとめと将来の展望については第6章に記述する．

第2章 目の形状による親しみやすさ 評価

本章では，親しみやすさを持ったロボットの目のデザインについて調査する．

2.1 ロボットの目のデザイン候補

Kobayashi ら [8] が着目した霊長類の目の形状パラメータに基づいて，目の横幅を基準に縦幅を 1, 0.5, 0.25 倍に変化させた丸，中，細の三段階の目の外部形状を準備する．同様に目の横幅を 1 として，黒目の直径を 0.75, 0.5, 0.25 倍に変化させた，大，中，小の三段階の黒目の大きさを作成した．以上のものを組み合わせて，図 2.1 のようにロボットの目のデザイン案を 9 種類作成した．顔の形状を円にし，顔表面を灰色にすることで，顔のデザインの影響を極力少なくした．目の外部形状が中，黒目の大きさが中の組み合わせ (図 2.1-E) は人間の目の形状に近い比率となっている．

2.2 日本人による親しみやすさの評価実験

図 2.1 に示した 9 種類の目を用いて親しみやすさの評価実験を行った．

2.2.1 実験方法

図 2.1 の 9 種のロボットの目のデザインの親しみやすさを調べるため，サーストンの一対比較法による評価実験を行った．2 つ 1 組となるロボットの目の画像を被験者へ提示し，「どちらのロボットの顔が親しみやすいですか？」という問いに対し

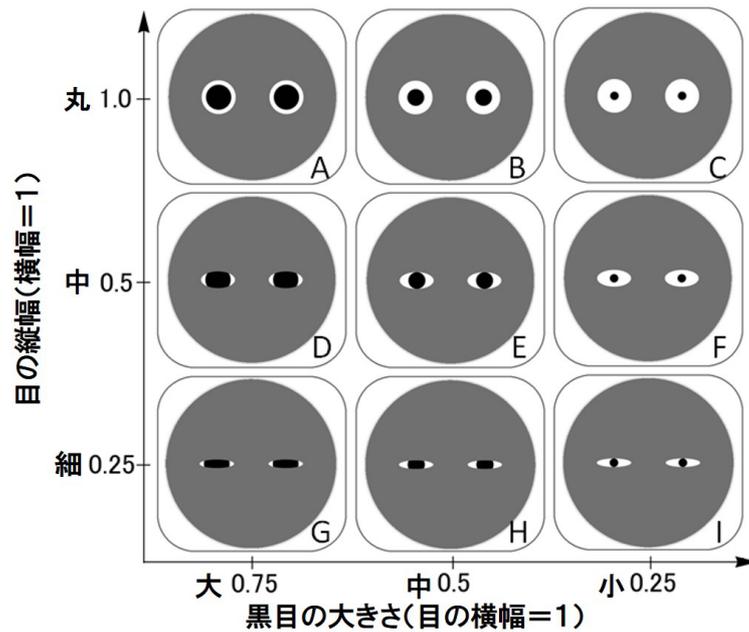


図 2.1: 目の縦幅と黒目の大きさを变化させ作ったロボットの目のデザイン候補

て、どちらか一方を選択する方法である．この方法では、9種の目で作られる全組み合わせ 36 組に対して 1 人の被験者が必ず回答する必要がある．データ収集のために、2つのロボットの目の画像を表示し選択できる Web システムを作成した (図 2.2)．被験者が操作する入力端末として iPad を用いた．このシステムは、一組のうち片方を必ず選択しなければ次の質問へは進めないようになっており、先に答えた回答結果を見ることはできない．また、ロボットの目の組み合わせ画像はランダム順に表示されるようになっている．被験者全員が日本人であったため、質問文は日本語で書いた．回答に時間制限はない．他者の回答が見えないよう配慮した．被験者は 20 歳前後の男女 105 人の日本人で、内訳は男性 60 人、女性 43 人、無回答 2 人となっており、ほとんどが大学教養学部の生徒である．

2.2.2 実験結果

集計結果は表 2.1 のようになった．この集計結果をサーストンの一対比較法による印象評価の分析を行なった．今回、サーストンの一対比較法でよく使われる Case V モデルではなく、Case III モデルを適用している．モデルの x^2 適合検定を行ったところ、表 2.2 のようになり、Case III モデルが $p > 0.05$ となって適合しているが、

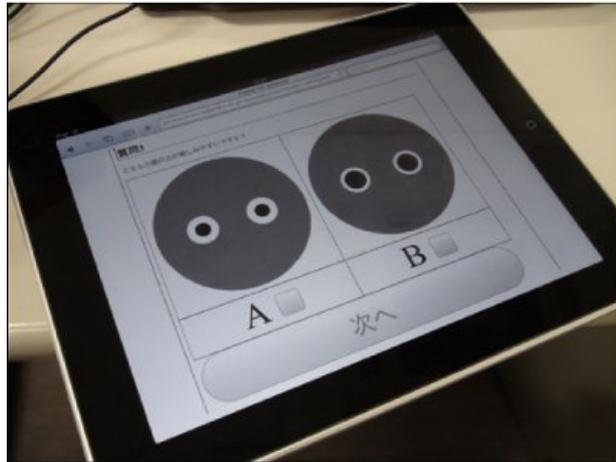


図 2.2: 一対比較を用いた親しみやすさの印象評価 (日本語)

Case V は適合していないことが分かる [19][20] . これは , Case III に比べ , Case V では仮定としている値が多いためである .

そこで , Case III による結果のグラフを図 2.3 に , 具体的な値を表 2.3 に示す . 最も値の低かった図 2.1-I を 0 として , グラフ化した . 結果をみると , 目の外部形状が丸で , 黒目が大の組み合わせ (図 2.1-A) が最も親しみやすいという評価を得た . また , 図 2.3 を見ると , 目の外部形状が丸又は中の値が高いことが分かる . 黒目と白目の面積を上位 4 つ (図 2.1-A・B・D・E) で調査したところ (表 2.4) , 図 2.1-B を除き黒目の面積の割合が白目の面積と同じがそれよりも大きいものとなっていた .

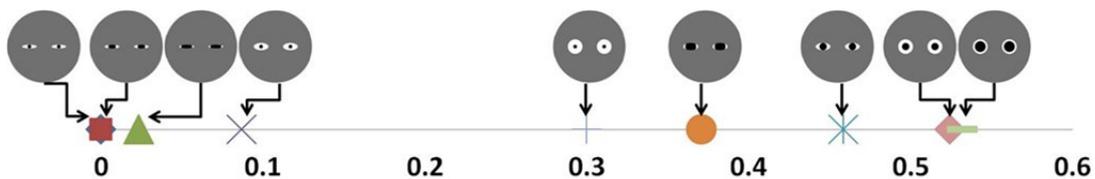


図 2.3: サーストンの一対比較を用いた親しみやすさの印象評価結果グラフ (日本人)

2.2.3 考察

この結果より親しみやすさを感じる要素として目の縦幅と露出している黒目と白目の面積比が考えられる . 評価結果からは , 目の横幅に対する目の縦幅の比率が人

表 2.1: 日本人学生による一対比較集計結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		24	17	18	23	10	7	7	4
B	81		10	30	35	11	10	9	7
C	88	95		44	57	23	28	25	17
D	87	75	61		59	30	5	10	18
E	82	70	48	46		9	13	5	8
F	95	94	82	75	96		43	51	26
G	95	94	82	100	92	62		48	51
H	98	96	80	95	99	54	57		34
I	101	98	88	87	97	79	54	71	
合計	727	646	468	495	558	278	217	226	165

表 2.2: サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (日本人)

	Case V	Case III
自由度	28	20
x^2 値	118.044	3.769
x^2 分布 (5%)	41.34	31.41

表 2.3: サーストンの一対比較法 case III モデルにより算出した尺度値 (日本人)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
尺度値 (I=0)	0.532	0.524	0.300	0.371	0.458	0.0870	0.0234	0.000169	0

表 2.4: 露出部における白目に対する黒目の面積比

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
面積比	1.294	0.331	0.062	5.203	1.046	0.137	6.255	1.518	0.335

図 2.1 のイラストより算出

間と同じまたはそれ以上に縦幅がある(本研究では丸のもの)と良く、露出している黒目の面積が露出している白目の面積と同じかより大きいものが良いと思われるような結果となった。今回の結果では、二つの要因に該当する目の外部形状が丸、黒めの大きさが大の組み合わせである図 2.1-A が最も良いものとなった。

2.3 英語を母国語とする留学生による親しみやすさの評価実験

2.2 節で行った実験の被験者は日本人のみであった。そこで、日本に来ている留学生に対しても実験を行い、2.2 節の結果と同様の傾向がみられるのか調査した。

2.3.1 実験方法

実験方法は 2.2 節のものと同様である。しかし、留学生の中には日本語が分からない者が多いため、質問文等は全て英語に差し替えた。差し替えたものを図 2.4 に示す。「These are robot faces. Which face do you think is more friendly?」という質問に対して、男女 29 人の被験者に回答してもらった。

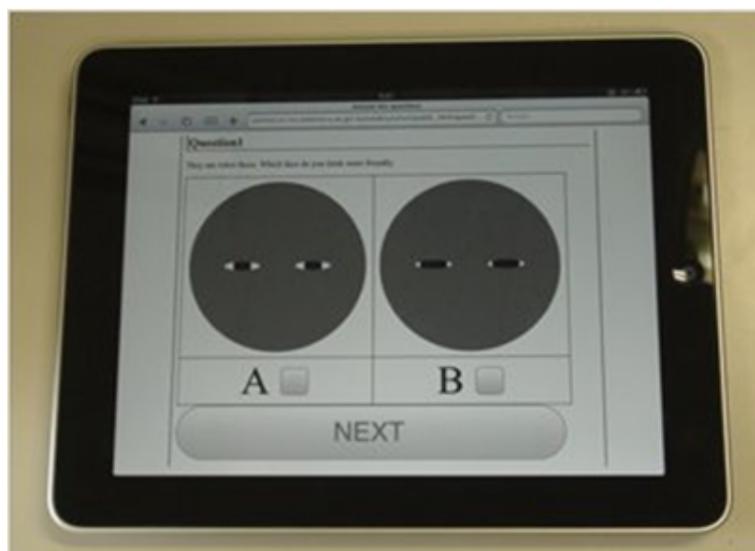


図 2.4: 一対比較を用いた親しみやすさの印象評価 (英語)

2.3.2 実験結果

集計結果は表 2.5 のようになった。

表 2.5: 留学生による親しみやすさ評価の集計結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		11	10	23	28	18	18	26	18
B	18		1	22	25	22	20	21	25
C	19	28		23	27	29	24	24	26
D	6	7	6		22	17	12	17	13
E	1	4	2	7		2	6	7	7
F	11	7	0	12	27		13	19	13
G	11	9	5	17	23	16		22	17
H	3	8	5	12	22	10	7		16
I	11	4	3	16	22	16	12	13	
合計	80	78	32	132	196	130	112	149	135

図 2.1 の F と C の組み合わせのとき，被験者全員が F を選んでしまう結果となつてしまった．これでは計算中に確率が 0 および 1 となつてしまい，標準正規分布の累積分布関数の逆関数の値が発散してしまう．日本人による評価結果の傾向と比較をするために，確率が 0 は 0.0001 に 1 は 0.9999 に置き換えることで値が発散することを防ぎ，グラフ化することにした．

モデルの x^2 適合検定を行ったところ，表 2.6 のようになった．Case III モデルが $p > 0.05$ となり，適合していることが分かる．そこで，Case III モデルで尺度値を計算しグラフ化した．

表 2.6: サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (留学生)

	Case III
自由度	20
x^2 値	29.69
x^2 分布 (5%)	31.41

尺度値およびグラフは表 2.7 および図 2.5 のような結果となった．尺度値は一番小さい値となる図 2.1-C を 0 とし，数直線上に並べている．図 2.5 を見ると，上位 2

つは目の外部形状が中のものである．その次には目の外部形状が大のものが2つ続いた．また，上位4つは図2.3の上位4つと同じもので，図2.1-Bを除き，露出している黒目の面積が白目よりも大きいという結果となった．

表 2.7: サーストンの一対比較法 case III モデルにより算出した尺度値 (留学生)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
尺度値 ($c=0$)	1.168	1.190	0	1.344	1.699	1.899	1.320	1.449	1.393

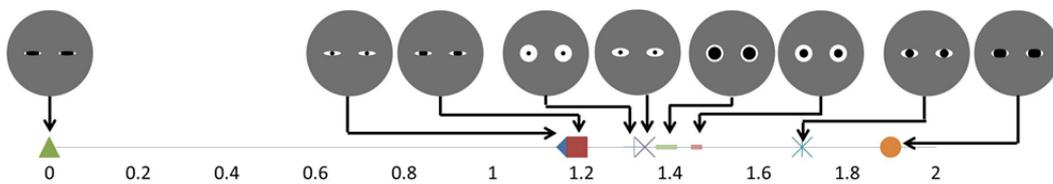


図 2.5: サーストンの一対比較を用いた親しみやすさの印象評価結果グラフ (留学生)

2.3.3 考察

2.2 節の日本人に対する実験結果と同様に，目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じまたはそれ以上に縦幅がある（本研究では丸のもの）と良く，露出している黒目の面積が露出している白目の面積と同じかより大きいものが良いと思われるような結果となった．だが，日本人の結果とは親しみやすさを感じる目のデザインの順位が異なる．

日本人では目の外部形状が丸い方が親しみやすいという結果となり，一方で留学生では実際の人間の目の外部形状に近い方が親しみやすいという結果となった．瞼間距離が長い目というものは，日本国内のアニメや漫画のキャラクターで良く見られる傾向である．日本人にとって見慣れてきたことが丸い目の評価が高かった原因として考えられる．

今回の実験では，被験者の人数が日本人に対して行った際は105人だったことに對し，この実験では29人にしか行ってない．また，アンケートの結果，選ばれた確立が0と1になってしまった組み合わせが出てしまった．そのため，日本人の結果と親しみやすさを感じる目のデザイン順位が異なるのはデータ数の問題なの

か、文化による差なのか本実験でははっきりしない。しかし、親しみやすさを感じる要素は日本人の結果と同様の傾向が見られた。そのため、目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じまたはそれ以上に縦幅があり、露出している黒目の面積が露出している白目の面積と同じかより大きい目が親しみやすさを感じやすいと結論付ける。

第3章 視線の読み取りやすさの評価

第2章では親しみやすさを持ったロボットの目のデザインについて調査した。本章では視線方向の読み取りやすいロボットのデザインについて調査する。

3.1 ロボットの構成

視線の読み取りやすさを調査するには実際に図2.1の様な目を再現したロボットを作成する必要がある。そこで様々な目を表現するために、黒目をCGで、目の外部形状をマスクで表現できるロボットの頭部を作成した。

3.1.1 ロボットの機構

使用したロボットの外観を図3.1に、マスクを外した状態を図3.2に示す。



図 3.1: 使用したロボット

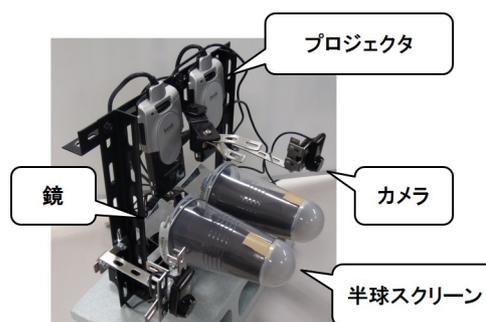


図 3.2: 図 3.1 のマスクを外した状態

ロボットのマスクは図3.2に示すように取り外しが可能であり、マスクを付け替

えることで、目の外部形状を変更することができる。マスクの直径は 25cm で、眼球の直径は 5cm、両目の中心間距離（ヒトで言う瞳孔間距離）は 10cm である。

プロジェクタ、鏡、スクリーンはそれぞれ右目と左目のため 2 台ずつ使用している。背後からプロジェクタを用いて CG で作られた眼球映像を半球のスクリーンに投影する。プロジェクタには、レーザプロジェクタ (SHOWWX+[18]) を用いているためフォーカスフリーで、非平面スクリーンに投影を行っても、すべての位置でボケの無い投影像を得ることができる。本研究では、レーザプロジェクタは実際にロボットの目を作り出す重要な要素であるため、図 3.3、表 3.1 に詳細な仕様を表記する。また、プロジェクタの光を表面反射鏡で反射させることで、投影距離を確保しつつ、コンパクトな形状とした。

将来的にはロボットの見る機能を追加することも想定しているため、Web Camera [11] をロボット頭部の両側に取り付けている。



図 3.3: SHOWWX+ (Micro Vision Inc.)

表 3.1: SHOWWX+ の主な仕様

本体寸法	118D × 60W × 14H(mm)
本体質量	約 122g
使用可能時間	約 2 時間
明るさ	15 ルーメン
画素数	848 × 480Pixels
アスペクト比	16 : 9
投影距離	150-2500mm
フォーカス	フリー
画像サイズ (対角)	6-100 型
リフレッシュレート	60Hz

3.1.2 眼球投影

ロボットの目映像の投影機能は，レーザプロジェクタと表面反射鏡，半透明な半球スクリーンから構成される．

具体的には，図 3.4 のように仮想空間にスクリーンと同じ形状の眼球モデルを CG で描画し，これを実世界でのスクリーンに対するプロジェクタ位置に相当する仮想空間内の位置からプロジェクタと同じ光学特性を持たせた仮想カメラで撮影してレンダリングする．このようにして作成した CG 映像をプロジェクタでロボットの眼球に相当する半透明の半球に裏側から投影することで，CG モデルと同等の形状とテクスチャを実世界に出現させている．目は CG で作られているため，黒目の大きさを簡単に変更することができる．

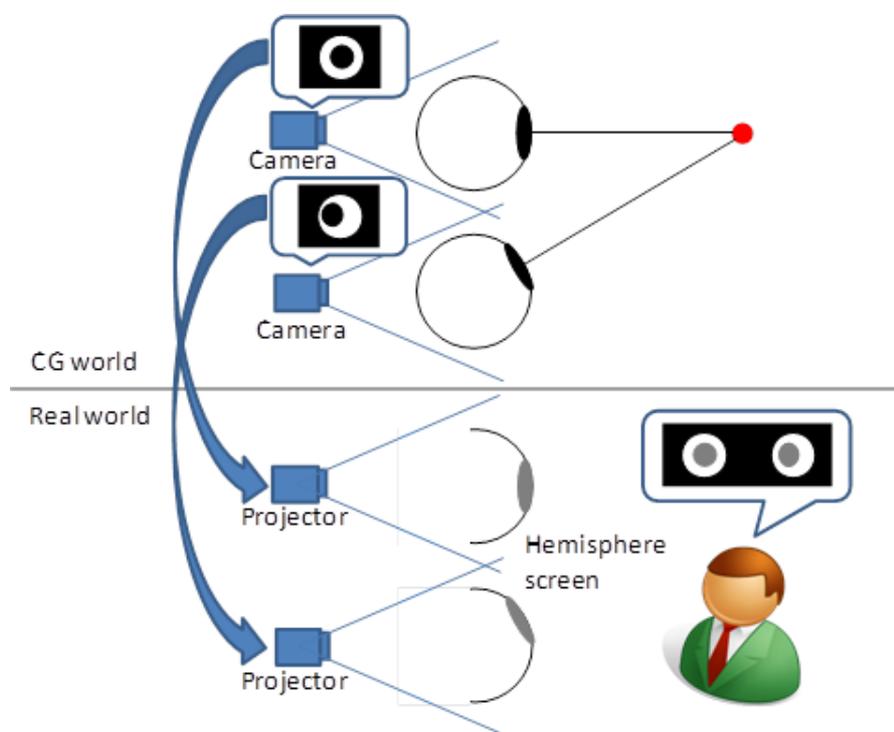


図 3.4: CG の目の投影方法

スクリーンには半透明の半球を用いることで，CG を用いて作られた眼球を投影しても不自然な歪みが出ないように配慮されている．視線方向は，一般に黒目の中心の法線方向であるが，顔や目を非平面スクリーンに投影する場合には，投影面の形状を幾何的に考慮して像を作成しないと，黒目の形状が歪むなど，視線方向を正確

に表現できない．図 3.1 のロボットでは，半透明の半球スクリーンに LED 電球のカバー (図 3.5) を用い，投影する CG 眼球モデルは，この半球と同じ形状で作成して投影している．CG で作成した眼球を同じ形状のスクリーンに背後から投影することで，CG の仮想空間で作成した眼球と同様の形状とテクスチャを実世界で表現している．

これまでも，映像を半透明スクリーンに裏側から投影することで，人間の顔やロボットの顔を表現するものはあった ([4], [12]) ．しかし，投影面の形状と投影による CG 歪みを考慮したものはなかった．今回作成したロボットは，実世界の投影面の形状と CG 世界のテクスチャの形状を考慮した．

実際に予備実験として，歪んだ半球スクリーン (図 3.6) に CG の目を投影して，後述する視線の読み取り実験と同様の実験を行った．図 3.7 に目の外部形状が丸を用いた場合における半球スクリーンと歪んだ半球スクリーンの視線読み取りの平均誤差を示す．黒目の大きさについては 3 パターンとも用いた結果となっている．歪んだ半球スクリーンへ投影された黒目の CG は，半球スクリーンと異なり投影面の形状に合致した形状とはなっていない．結果を見ると，半球スクリーンに比べて，歪んだ半球スクリーンへの投影では，視線の読み取り精度が大きく低下した．これは，黒目の円の歪みや，両目の輻輳が正確に表現できていないことに起因すると考えられる．この問題を予備実験において，被験者の位置を基準として右側と左側の対称位置にあるマーカの読み取り誤差の分布形状が異なることから気づいた．



図 3.5: 半球スクリーン (日立製 LED 電球のカバー)



図 3.6: 歪んだ半球スクリーン

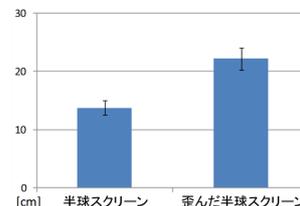


図 3.7: 半球スクリーンと歪んだ半球スクリーンの視線読み取り平均誤差の比較

図 3.8 に示すように，それぞれの目の外部形状および黒目をマスクおよび CG で作成することで，それらの組み合わせで図 2.1 に示した 9 つの目を表現した．

もちろん，顔を投影して瞬きを表現することが簡単にできる．テクスチャを変更することで，様々な黒目のデザインが表現可能である．例えば，図 3.9(左) は虹彩と瞳孔を表現したテクスチャを用いた黒目のモデルである．図 3.9(右) は注視対象のビデオ映像を重畳表示し，眼球表面での反射像を表現したものである．また，PC スクリーン上のバーチャルキャラクタなどで，検討されてきた視線や感情の表現に関する知見 ([28]) を応用することもできる．さらに，物理的な駆動機構を持たないため，例えば，人間の眼球運動の特性である固視微動やサッケードなど，高速な眼球運動を表現することもできる．

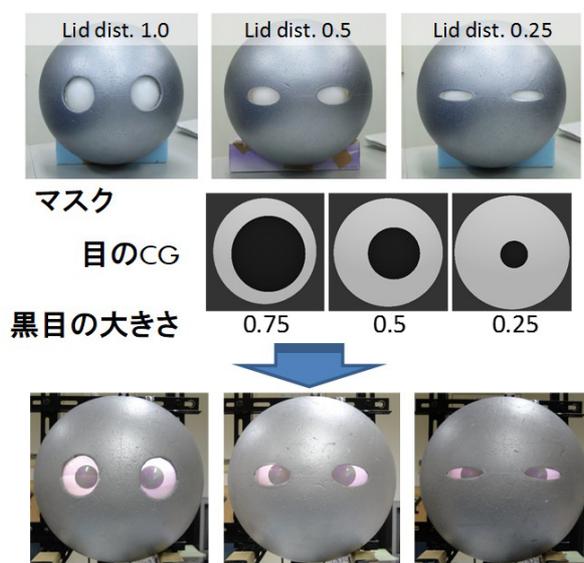


図 3.8: ロボットの顔表現

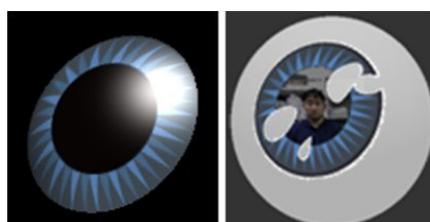


図 3.9: (左) 虹彩と瞳孔のある黒目のモデル，(右) 表面反射を表現したビデオテクスチャを映した眼球

3.1.3 視線制御のための実世界観測

人間は顔の正面に近いものを見ようとするとき、寄り目になる。他者の3次元的な注視点を読み取ろうとする場合、両目の輻輳も重要な手がかりとなる。ロボットの場合でも、左右の目を独立に制御し、眼球を特定の3次元点に向ける必要がある。そこで、ロボットの左右に取り付けた2台のカメラ(図3.1)を用いて、注視対象の3次元位置を計測することで、物体方向へ視線を向けられるようにした。

ステレオ視を用いて3次元の目標位置を推定するために、2台のカメラで得られる画像を使用する。あらかじめ実世界の座標系とCG世界の座標系を対応させておき、得られた実世界座標の3次元位置をCG世界の三次元座標に変換する(図3.10)。そしてXY平面上の角度 θ_1 と θ_2 を計算する。最後に、目のCGモデルをそれぞれ目標位置の方向へ回転させる。図3.10では水平方向での回転を示しているが、垂直方向でも同様である。

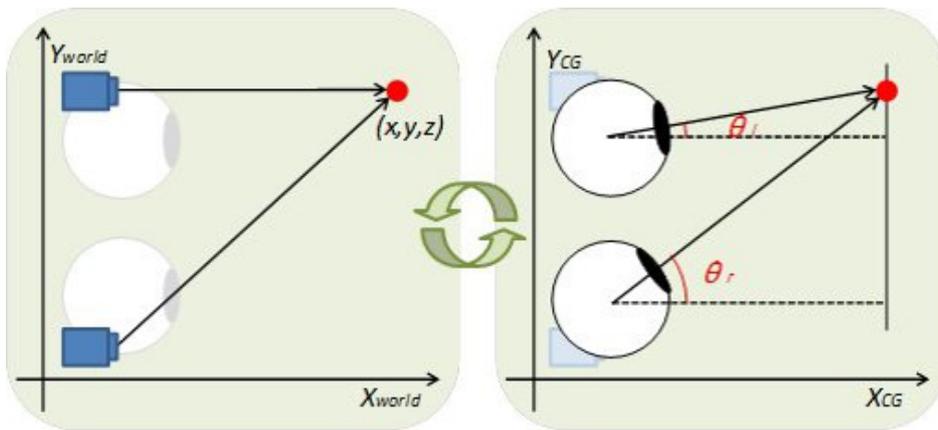


図 3.10: カメラを用いた視線方向の制御

3.2 視線方向読み取り易さの評価

目のデザインと視線の読み取りやすさの関係を調べるために、3.1節で紹介したロボットと図2.1を用いて視線方向の読み取り実験を行い、読み取り誤差を評価した。

3.2.1 実験方法

実験は、ロボットと被験者の間にマーカを設置し、ロボットの目がどのマーカを見ているかを被験者に答えてもらう形式で行った。図 3.11 に示すように、ロボット頭部からマーカまでは 50cm、マーカから被験者までの距離は 100cm とした。マーカは 0 番から 18 番までとし、10cm 間隔で中央が 9 番になるように設置した。実験で用いる目の形状は、図 2.1 に示した 9 種であり、実験中に表示される視線方向は 4 番から 14 番のマーカのどれかとした。これは、両端にあるマーカ 0 番または 18 番をロボットが見た場合、被験者が例えそれらのマーカよりも外側を見ていると思っただとしてもマーカを見るはずと考え 0 番または 18 番と回答する可能性があるためである。その問題を排除するために、マーカの両端とそれに近いマーカは使用しなかった。また、回答時に頭の位置が同じになるように被験者の顎を固定して実験した。被験者からロボットが図 3.12 のように見える。

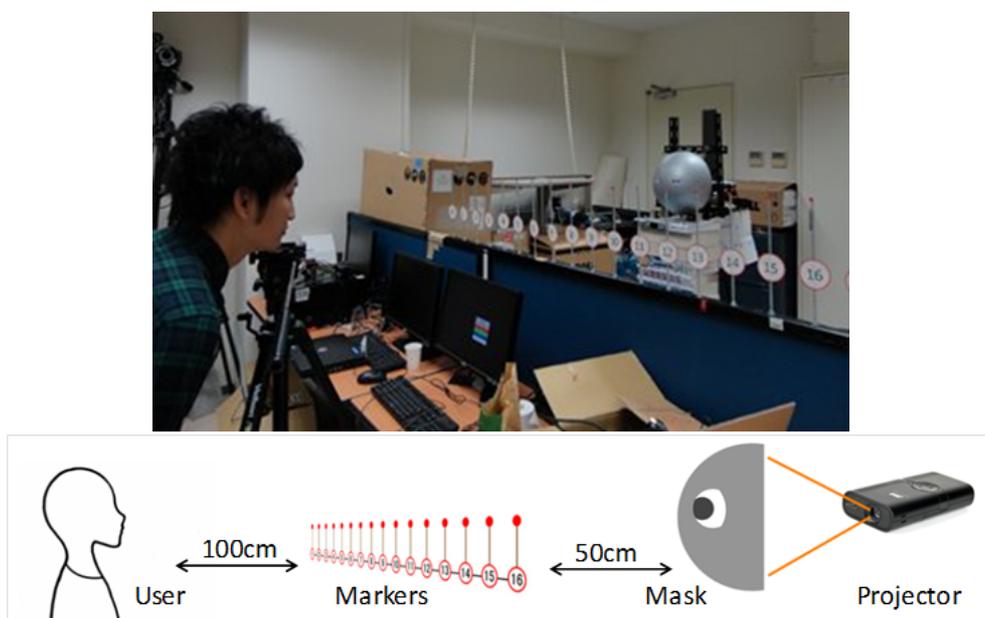


図 3.11: 視線方向読み取り実験の実験風景

被験者は 20 歳前後の男女 36 人である。内訳は男 30 人、女 6 人で大学工学部の生徒である。被験者を 3 グループに分け、それぞれ異なる目の外部形状のマスクを使用した。全ての被験者に対して、ランダム順に投影される黒目の大きさと視線方向を変化させ、どのマーカをロボットが見ているかを回答してもらった。被験者 1 人当たり、目の外部形状 1 種、黒目の大きさ 3 種、ロボットが見るマーカ 11 種の計 33

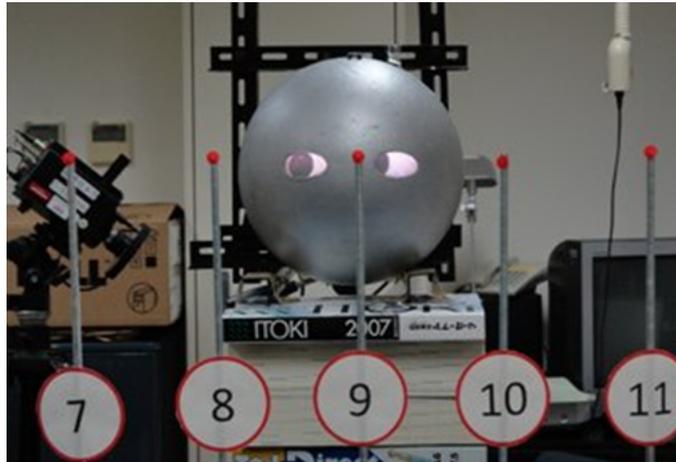


図 3.12: 視線方向読み取り実験中の被験者から見るロボットの状態

パターンの組み合わせを見て回答することになる。目は5秒間投影され、5秒間のインターバルを挟み、再び投影される。投影された目はすでにいずれかのマーカを見ている状態である。被験者には直観的に視線を読んでもらいために、被験者が回答した場合5秒待たずに目の表示を止めた。実験は1人当たり5分ほどかかった。

3.2.2 実験結果

図 2.1 に示した9種の目ごとに正解値からの誤差をとり、平均値をとったところ、図 3.13 のような結果となった。2 要因の混合分散分析を行なった結果を表 3.3、多重比較結果を表 3.4 に示す。今回の多重比較にはボンフェローニ法を修正したホルム法 [6] を利用した。その結果、黒目大と小、黒目中と小の間で有意差が見られ、小に対して大と中は視線が読み取りやすくなることが分かった。

表 3.2: ロボットの目ごとの視線方向読み取り平均誤差

	A	D	E	H	G	F	B	I	C
平均誤差	11.36	11.67	11.97	12.05	12.42	15.08	15.53	16.14	17.42
標準偏差	1.113	1.156	1.158	1.235	1.169	1.401	1.305	1.546	1.324

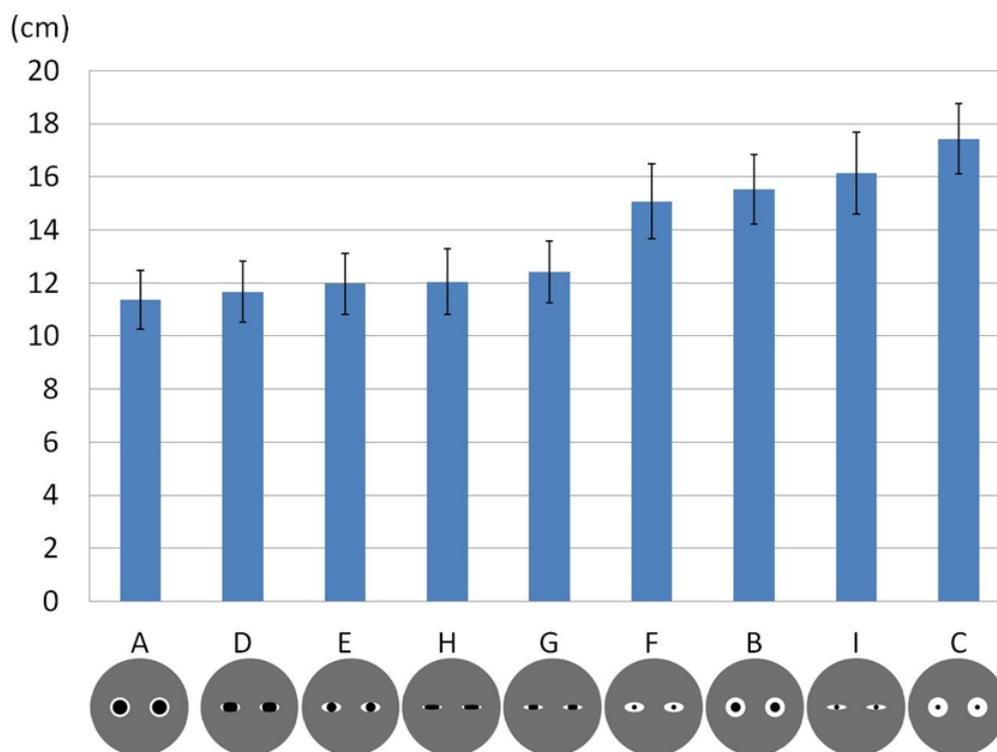


図 3.13: 視線方向読み取り平均誤差グラフ (平均誤差の小さい順)

表 3.3: 視線読み取り平均誤差の分散分析 (静止)

S.V	df	F	η^2	p
A	2	0.76	.023	.26
B	2	12.78	.13	.001
A × B (interaction)	4	1.19	.023	.59
s × B	66			

A=目の外部形状, B=黒目の大きさ

表 3.4: ホルム法による多重比較

黒目の大きさ	データ数	平均 (cm)
大	36	11.8
中	36	13.25
小	36	16.25
比較	p	
大 = 中	n.s(alpha'=.0500)	
大 < 小	$p < .05$ (alpha'=.0167)	
中 < 小	$p < .05$ (alpha'=.0250)	

マーカごとに平均誤差と標準偏差を計算した。その結果を図 3.14 と表 3.5 に示す。図 3.14 では、目のデザインごとの平均誤差も示している。中央から離れるごとに誤差が大きくなっていることが見て取れる。

表 3.5: マーカごとの角度と平均誤差及び標準偏差

マーカ番号	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
正解値 (degree)	-45	-38.7	-31	-21.8	-11.3	0	11.3	21.8	31	38.7	45
平均誤差 (degree)	22.06	20.84	15.53	13.17	6.69	2.46	9.82	12.21	16.14	19.88	19.72
標準偏差	12.66	14.04	12.28	10.98	7.63	5.84	8.45	9.39	11.59	12.84	13.92

3.2.3 考察

視線の読み取りやすさには黒目の大きさが影響すると考えられる。図 3.2 を見ると、G と F の平均誤差の間に差があるように見える。表 2.4 はイラストから算出した露出部における白目に対する黒目の面積比だが、図 2.1-A・D・E・G・H は黒目の面積が白目の面積と同じかそれよりも大きいものだった。また、図 2.1-A・D・E・G・H の黒目は上下の瞼と接している。それにより、黒目が移動することで黒目を境として左右の白目の面積変化が現れることになる。これは、人は視線を読み取る際、その目領域内の明度差の分布を手掛かりとしている Ando ら [1] の主張と合致する。黒目を境とした露出した左右の白目の面積変化が起こることで、視線が左右のどちらかを見ているだけでなく、より具体的な方向を人間に伝えることができたのではないかと考えられる。図 2.1-I の目は黒目が上下の瞼と接しているが、実験結果は下か

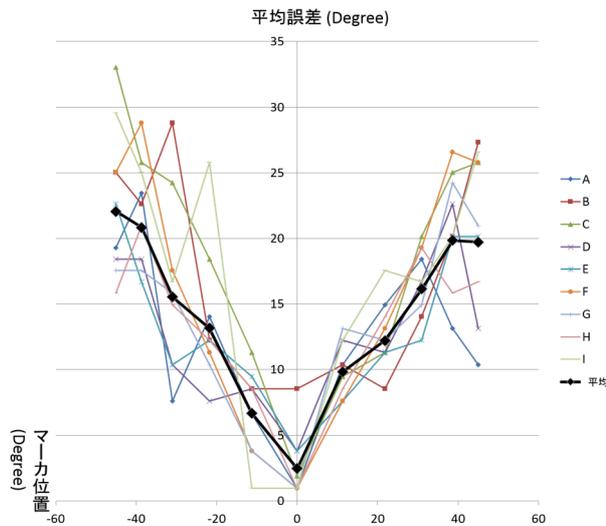


図 3.14: マーカごとの平均誤差
(A-I : 図 2.1)

ら 2 番目に平均誤差が大きかった．図 2.1-I は表 2.4 によると露出している白目の面積は黒目の面積よりも大きいものだった．露出している白目の面積が黒目に対して大きいため，黒目が移動した程度では左右の白目の面積変化を気づきにくくしていた可能性がある．それが，黒目の大きさが大と中のものが小に対して平均誤差が小さくなった要因と推測される．

3.3 眼球動作の有無による視線方向読み取り実験

3.2 節で行った視線読み取り実験では，目が動く様子を被験者へは見せていない．そこで，目を動かした場合での視線の読み取りやすさの評価を行い，目の動きがあることで視線の読み取りやすさに影響があるのかを調査した．

3.3.1 実験方法

実験環境や方法等全て 3.2 節で行った実験と同じものにした．表示する目のみを変えた．はじめ，ロボットは正面にある 9 番のマーカを見ている．その後，4 番か

ら 8 番, 10 番から 14 番のいずれかのマーカまで等速で視線が移動する。ロボットの目の動きが止まったとき, その視線の先にあるマーカを被験者に読み取ってもらった。被験者は 20 歳前後の男女 30 人である。

3.3.2 実験結果

図 3.15 およ表 3.6 に実験結果を示す。眼球動作ありの実験では 9 番マーカを見ることはなかったので, 3.2 節で行った実験結果からロボットの目が 9 番マーカを見ているときの回答を除き, 眼球動作なしの平均誤差を算出した。図 3.15 を見ると, 全ての目において目が動いたものの方が, 平均誤差が小さくなっている。同様に, 表 3.6 を見ると, 全ての目において目が動いたものの方が, 標準偏差が小さくなっている。3 要因の混合分析の結果を表 3.7 に示す。結果を見ると, 眼球動作の有無に有意差が見られる。

眼球動作無しるときと同様にマーカごとの平均誤差と標準偏差を計算した。全ての眼球動作有りでのデータを用いた結果を図 3.16 と表 3.8 に示す。眼球動作有りの場合であっても, 中央から離れるごとに平均誤差は大きくなっていくことが分かる。

表 3.6: 眼球動作の有無による平均誤差と標準偏差の比較表

平均誤差 (cm)	A	D	E	H	G	F	B	I	C
眼球動作無	12.42	12.5	12.83	13.17	13.58	16.5	16.33	17.67	19
眼球動作有	9.83	9.55	9.91	8.5	8.67	16	11.17	12.33	13.33
標準偏差	A	D	E	H	G	F	B	I	C
眼球動作無	1.113	1.156	1.158	1.235	1.169	1.401	1.305	1.546	1.324
眼球動作有	0.8464	0.9852	0.9486	0.8332	0.8654	1.295	1.034	0.9894	1.135

3.3.3 考察

目が動くことで, より視線が読み取りやすくなることが結果から分かった。このことから, 視線を用いたコミュニケーションを行うには, 眼球の動作を重要なものとして考えていかなければならない。眼球が動いた場合であっても, やはり露出部において, 白目に対する黒目の面積が大きい目の方が視線を読み取りやすい結果となっている。これは, 黒目を境とした露出している左右の白目の面積変化がとらえやすくなったからではないかと考えられる。

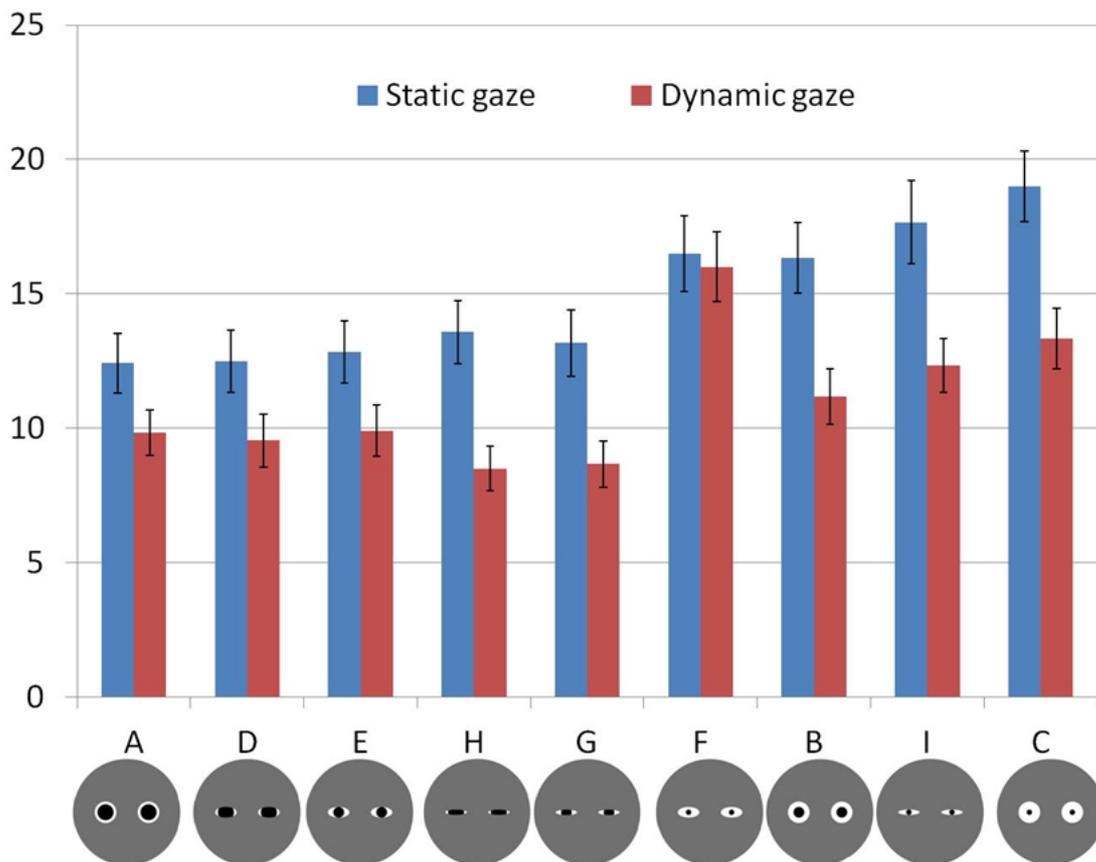


図 3.15: 眼球動作の有無による平均誤差比較グラフ

表 3.7: 視線読み取り平均誤差の分散分析 (動作)

S.V	df	F	η^2	p
A	2	0.63	.017	.18
B	2	20.85	.10	.00
A × B	4	1.87	.018	.45
s × B	52			
C	1	16.26	.099	.00
A × C	2	0.80	.0097	.29
s × C	26			
B × C	2	0.56	.0022	.77
A × B × C	4	1.80	.014	.29
s × B × C	52			

A=目の外部形状, B=黒目の大きさ, C=眼球動作の有無

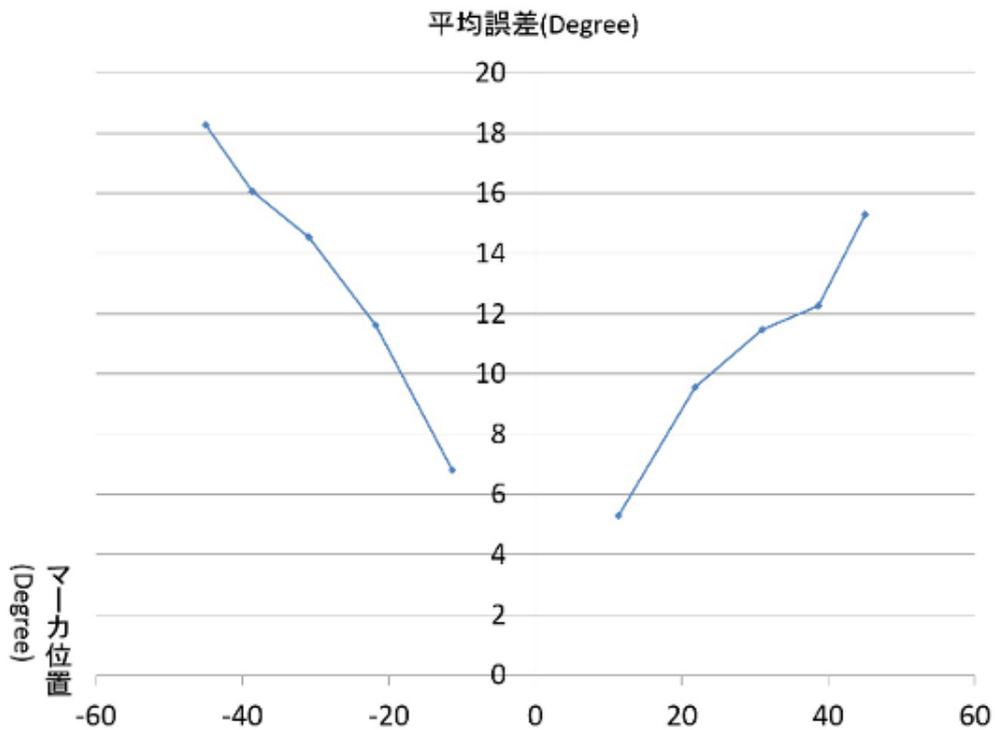


図 3.16: 眼球動作がある場合でのマーカごとの平均誤差

表 3.8: マーカごとの角度と平均誤差及び標準偏差

マーカ番号	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14
正解値 (degree)	-45	-38.7	-31	-21.8	-11.3	11.3	21.8	31	38.7	45
平均誤差 (degree)	18.27	16.05	14.56	11.62	6.822	5.292	9.559	11.48	12.27	15.3
標準偏差	10.31	11.07	11.26	9.945	8.298	6.546	8.103	10.66	10.99	11.396

第 2 章では親しみやすさを感じやすいロボットの目のデザインについて調査し、第 3 章では視線方向の読み取りやすいロボットの目のデザインについて調査した。それにより、親しみやすさと視線の読み取りやすさを兼ね備えたロボットの目のデザインを得ることができた。親しみやすさと視線の読み取りやすさの双方で、最も良い結果となったのは図 2.1-A の目であった。

3.4 頭部回転を用いたロボットの顔の違いによる視線方向読み取り易さの評価

前節までに目のデザインについて言及してきたが、顔の形状についても重要である。人間は共同注意を行う際、必ずしも相手の目を見ているわけではない。顔の向きや体の向きから注視方向を推測する場合もある [26]、そこで、ロボットの顔の違いにより視線の読み取り易さに違いが出るのか評価実験を行なった。

3.4.1 ロボットの顔のデザイン

Delaunay 等 [4] は顔の形状による視線の読み取りやすさの比較をしたとき、実際の人間の顔の次に人間の顔を模した凹凸を持つマスクにアニメーションの顔を投影したものが良いという結果となっていた。これは鼻があることで顔の中央が分かりやすくなったためではないかと考えた。そこで、平面の顔 (図 3.17)、半球の顔 (図 3.18)、半球+鼻の顔 (図 3.19) の 3 つを用意した。投影されている目は、図 2.1-A と同じ比率になるようデザインしてある。

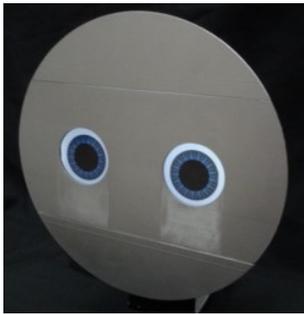


図 3.17: 平面の顔



図 3.18: 半球の顔



図 3.19: 半球+鼻の顔

3.4.2 実験方法

実験の手順とセッティングは3.2節で行った視線読み取り実験と同様の方法で行った。ロボットがマーカを見る方法について説明する。ロボットは初め正面を見た状態である。後述する人間の振り向き方から得られた、目標物へ振り向く際に加速し減速するような速度変化のある頭部回転により、目的のマーカへ顔方向が移動する。その後再び正面のマーカへ等速移動で戻る。その動作を繰り返す。この間、ロボットの眼球は50cm先正面を見ている状態で動かない。

1人の被験者が3つの顔それぞれから視線を読む被験者内実験を行った。被験者は20歳前後の男女16人である。

3.4.3 実験結果

結果を図3.20と表3.9に示す。結果を見ると、半球+鼻が最も平均誤差が小さいことが分かる。それに続いて、平面、半球の順に平均誤差が小さい。これらの結果を分散分析した。その結果を表3.10に示す。すると、有意差が示された。さらにホルム法による多重分析を行った結果、それぞれに有意差が見られ(表3.11)、半球+鼻、平面、半球の順にロボットの視線が読み取りやすかったことが示された。また、実験中、被験者から鼻先から矢印が出ているように感じるとコメントをもらった。

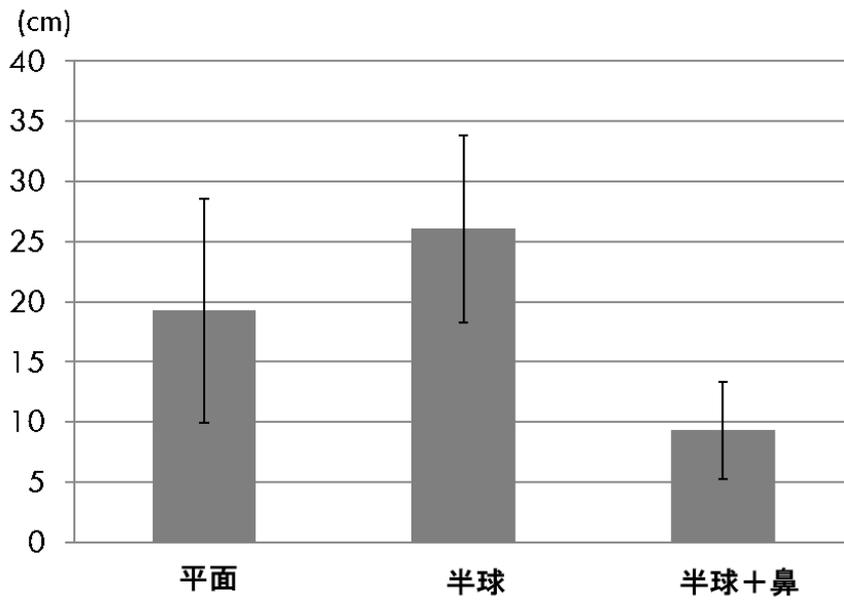


図 3.20: 顔の形状の違いによる平均誤差比較グラフ

表 3.9: 顔の形状の違いによる平均誤差と標準偏差

	平面	半球	半球+鼻
平均誤差 (cm)	19.25	26.06	9.31
標準偏差	9.28	7.76	4.011

表 3.10: 顔の形状の違いによる視線読み取り結果の分散分析

S.V	df	F	η^2	p
A	2	19.67	.466	.727E-06
s × A	45			

表 3.11: 顔の形状の違いによる視線読み取り結果のホルム法による多重比較

顔	データ数	平均 (cm)
平面	16	19.25
半球	16	26.06
半球+鼻	16	9.31
比較	<i>p</i>	
平面 < 半球	.747E-02	
平面 > 半球 + 鼻	.181E-03	
半球 < 半球 + 鼻	.243E-07	

3.4.4 考察

今回の実験から、顔の形状、特に鼻は視線の読み取りやすさに影響を与えると考えられる。鼻があることで視線が読み取りやすくなる理由としては、両眼と鼻の位置から顔中央がイメージできたためではないかと考えられる。首の回転中心から顔中央への点を結ぶ直線をイメージすることで、顔の向きが分かりやすくなったのではないだろうか。これが、被験者が感じた矢印の原因ではないかと考える。平面及び半球は顔の中央が分かり辛く、首の回転中心と顔中央の2点間の直線が引けず、顔の方向がわかりづらくなったと考えられる。

第4章 視線の自然な動作

4.1 プロジェクタの目と機械の目の比較

ロボットの目にCGを用いてきたが、このままCGを用いてよいのかは分からない。そこで元来の機械の目と今回提案するCGの目で印象に違いが出るのか念のために調査を行った。

4.1.1 実験方法

前章までの実験結果から、人間の目の形状の比率を基準とした9種のロボットの目において、親しみやすさと視線の読み取りやすさの双方で、もっとも良い結果となったのは、図2.1-Aの目であった。

この結果に基づいて、実際に市販されているロボット(Robovie-R ver.3 by Vistone)に、ロボットの目を実際に組み込んだ。図4.1は組み込む前(図4.1-左)と後(図4.1-右)のロボットの頭部である。見る機能を実現するためのカメラは、超小型カメラ(CMOS Camera module NCM03-V by Asahi Electronics Laboratory)を図4.1-右に示したロボットの目の下にあるドリルで開けた小さな穴の部分に取り付けている。本来のRobovieのカメラは、目に搭載されている。

図4.1に示した機械の目(元来の目)とCGの目(提案する目)が与える印象の比較実験を行なった。被験者はそれぞれの目の動作を見た後、質問に対してどの程度適しているか7段階(1:非常にCGの目; 2:かなりCGの目; 3:ややCGの目; 4:どちらでもない; 5:やや機械の目; 6:かなり機械の目; 7:非常に機械の目)で評価した。質問は次の6つの質問について解答した。

1. 見た目はどちらの目の方が好きですか?(見た目)
2. どちらの目の方が見ている感じがしますか?(見ている感)
3. どちらの目の方が表現力があるように感じますか?(表現力)

4. どちらの目の方が違和感が少なく，より自然に感じましたか？(自然さ)
5. どちらの目の方が親しみやすく感じましたか？(親しみやすさ)
6. どちらの目の方が機械的に感じましたか？(機械的)

機械の目は，機械の目が左右に動いている様子をビデオカメラで撮影したものを被験者に見せた．CGの目は実際にロボットに搭載したものを左右に動かして被験者に見せた．本来ならば同条件にすべきであったが，ロボットが一台しかなく機械の目は動画を用いた．また，CGの目ではレーザープロジェクタを使用しているため，ビデオカメラで撮影すると水平の線が表示されてしまう，CGの明度差が表れづらく実物と大きく異なるため，実物を見せるしかなかった．被験者は20代前半の男女25人の工学部の学生である．

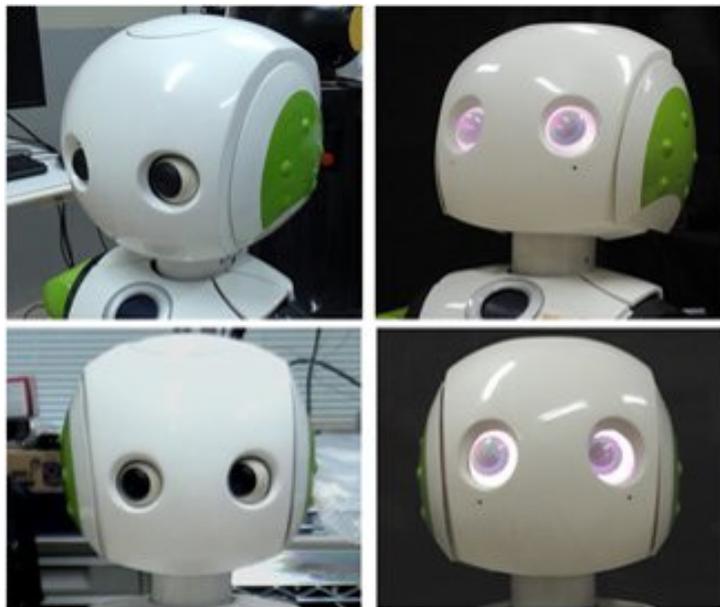


図 4.1: Robovie-R Ver.3 : (左) 機械の目，(右)CGの目

4.1.2 結果と考察

その結果を図 4.2，符号検定の結果を表 4.1 に示す．CGの目では機械の目に対して「どちらの目の方が見ている感じがしますか？」(見ている感)、「どちらの目の方が表現力があるように感じますか？」(表現力)において，良い評価を得られた．有意水準が0.05のとき，表現力には有意差が認められた．他の質問に置いてはCGの

目と機械の目で有意差は見られなかった．しかし，元来の機械の目では動くときと駆動音がし，人間の目よりも動作が遅い．これに対して，今回提案するプロジェクトで投影するCGの目では，動きも早く，滑らかで静かである．今回の実験では有意差があった「見ている感」と「表現力」についてはCGの目が良いという結果になっている．そこで，眼球動作を調査するためのロボットにはCGの目を用いる．

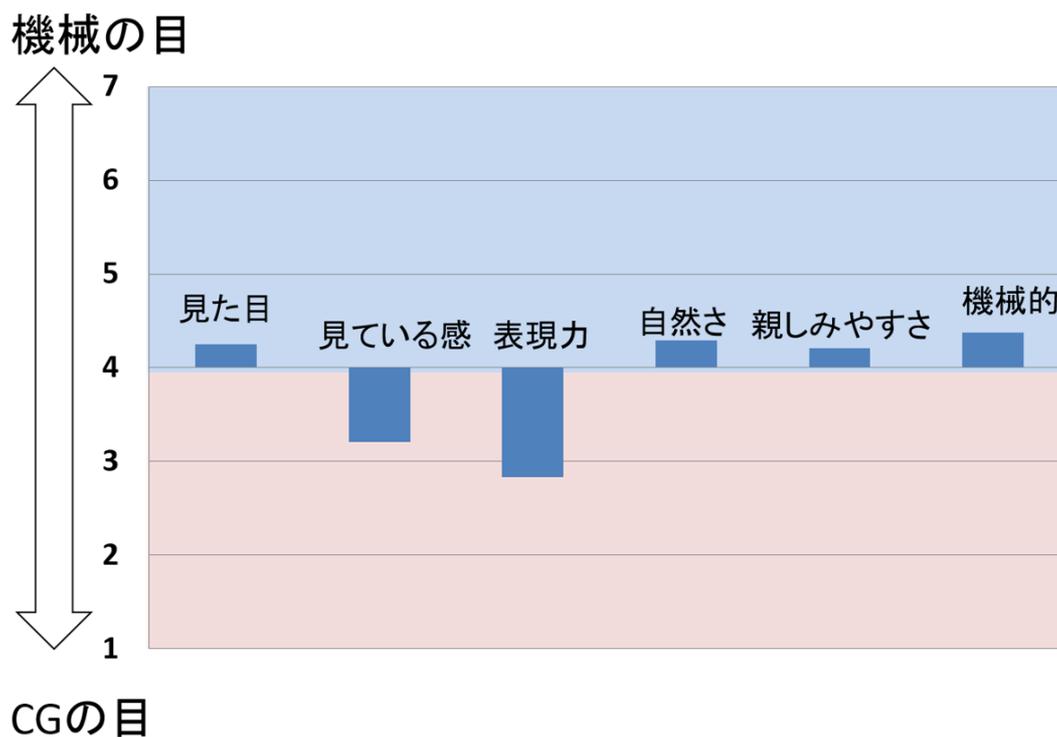


図 4.2: 機械の目とCGの目の印象評価結果

表 4.1: 機械の目とCGの目の印象評価符号検定結果

	見た目	見ている感	表現力	自然さ	親しみやすさ	機械的
平均値	4.25	3.21	2.83	4.29	4.21	4.38
p 値	0.08307	0.08306	0.03469	0.1343	0.1783	0.08318

4.2 人間の注視行動の観察

実際に人間が視線を移動するとき、目・首の動きはそれぞれどうなっているか実験により観察する。

4.2.1 実験方法

実際の観察している様子は図4.3のようであり、右に座っている人物が被験者である。被験者の前に左から順に番号の書いてあるマーカを設置する。被験者からマーカまでの距離は50cmである。図4.3の状態では被験者に座ってもらい、マーカに書いてある番号を次々と指定していく。そしてその指定した番号の書いてあるマーカを被験者に順番に見てもらい、その様子をカメラで録画する。また、被験者の頭の上に付いている加速度センサ [21] で被験者の振り向き速度を計測する。振り向き速度計測の様子は、図4.4右のようになっている。横に加速度センサが振れると、グラフがそのときの速度変化の様子を示す。



図 4.3: 首振り動作観察風景

4.2.2 結果と考察

速度変化の様子と首の動きの様子は図4.5のようになった。図4.5では、被験者の振り向き角度が大きいときの速度変化の様子を実線で描かれているグラフで、被

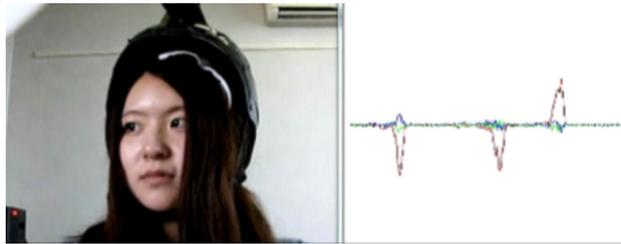


図 4.4: (左) 被験者正面に置かれたカメラからの画像，(右) 縦を速度，横を時間とした場合での加速度センサによる計測結果のグラフ

験者の振り向き角度が小さいときの速度変化の様子を点線で描かれているグラフで表した．図 4.5 を見ると，頭部回転の速度は加速し減速するという速度変化があることがわかった．また，振り向く際に瞬きをすることがわかった．速度変化が人間の滑らかな動きを作り出しているため，今回の頭部回転の速度変化は，自然な動作をロボットで再現するには重要な要素であると考えられる．また，振り向く際に瞬きをするという点については，これが人間にどのような印象を与えるか調査してみなければ分からない．今回の実験では，頭部回転角度の大小に関わらず，振り向きにかかる時間はほぼ同じであるという結果となった．これは，振り向く先のマーカを指定するタイミングが関係していると思われる．観察中，被験者のほとんどが目から動き，そのあと首の動きが動きだす振り向きを行った．人間は予期していない刺激に対しては目が先に動きだしそれに首が追従する形で振り向きを行なう [5]．今回は指定されたマーカを見るという，視線の移動先が予期できない状況であったためだと思われる．

4.3 ロボットの振り向き印象評価

前節の頭部回転の速度は加速し減速するという速度変化があるという結果をもとに，首の動きのみを人間の振り向きに近付けたロボットを実装し，印象評価実験を行った．

4.3.1 印象評価方法

速度変化のある頭部回転と等速の頭部回転をそれぞれ用いて被験者の方へロボットが振り向くという動作を被験者に見てもらい，それぞれの振り向きの印象に関する

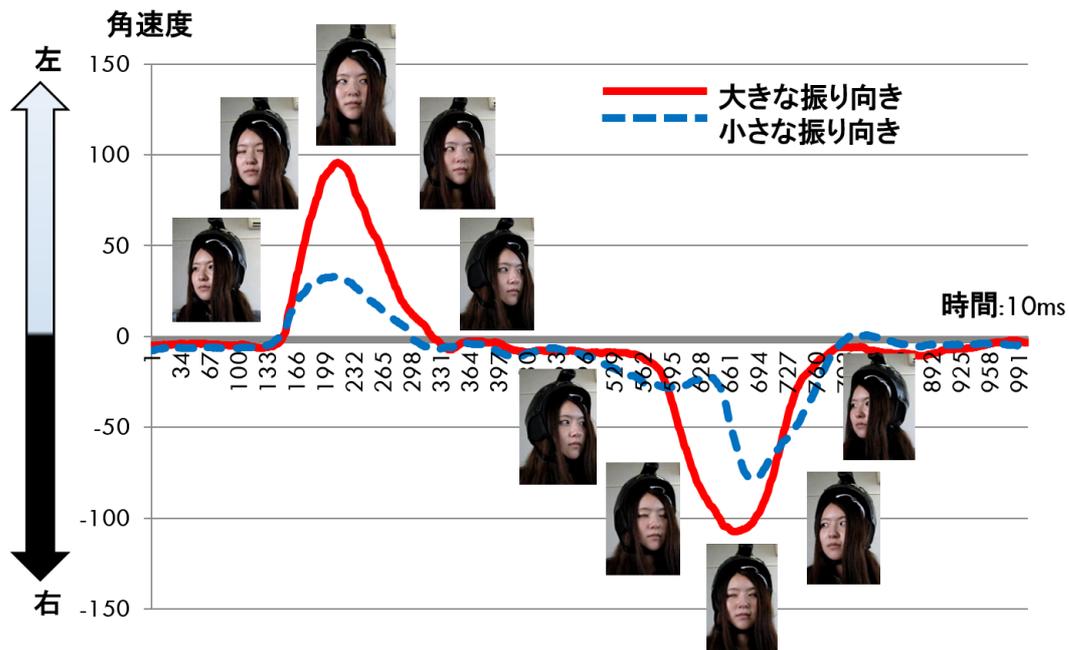


図 4.5: 首振りの傾向

るアンケートに答えてもらう。図 4.6 は実際の実験での被験者がロボットの振り向きを見ている様子である。2つの振り向きを行うロボットをそれぞれ被験者に見てもらい、それぞれの振り向きの印象に関するアンケートに答えてもらう。図 4.7 にロボットの首の速度変化を計測した結果を示す。

アンケートで質問する項目は以下の表の通りである。

1. どちらの動作の方が好きですか？(好感)
2. どちらの動作の方が振り向いた感じがしましたか？(振り向いた感)
3. どちらの動作の方が見られた感じがしましたか？(見られた感)
4. どちらの動作の方が自然に感じましたか？(自然さ)
5. どちらの動作の方が親しみやすいと感じましたか？(親しみやすさ)
6. どちらの動作の方が機械的に感じましたか？(機械的)

回答欄の項目はすべて7段階評価である。被験者は20歳前後の男女20人に対して行った。



図 4.6: ロボットの振り向き印象評価の様子

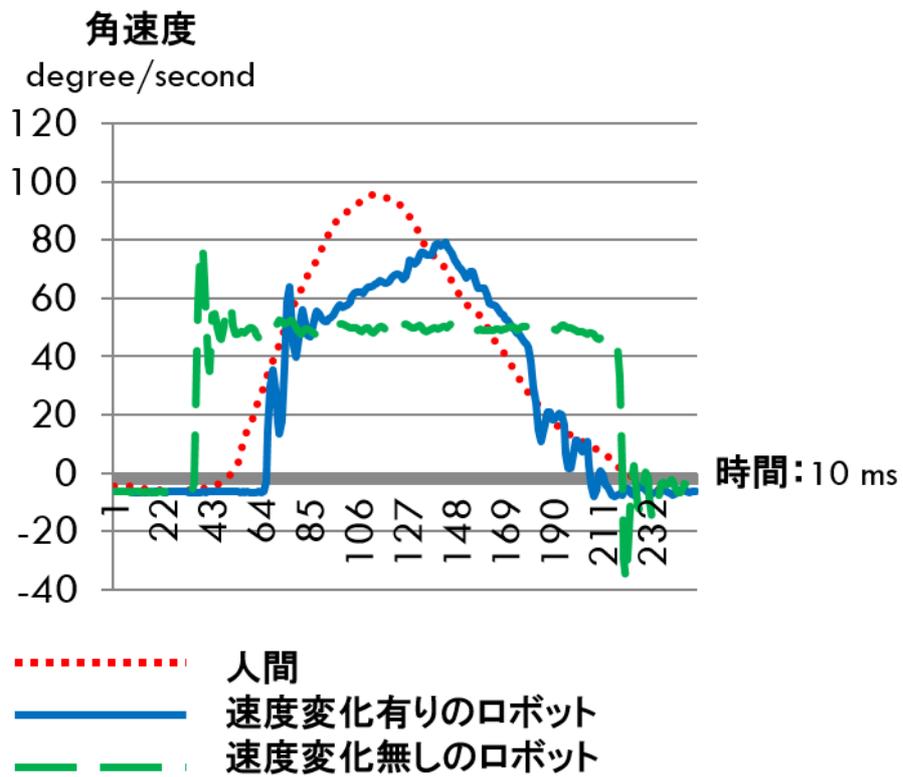


図 4.7: ロボットの振り向き速度グラフ

4.3.2 評価結果と考察

結果を図 4.8 に，符号検定の結果を表 4.2 に示す．好感，振り向いた感，見られた感，自然さ，親しみやすさに関しては速度変化ありのほうが多く選ばれた．また得られた結果を元に有意水準 5% で検定を行った結果，振り向いた感じがするという項目以外で有意な差が得られた．これは Saerbeck ら [16] による結果と同様に，加速が影響していると考えられる．

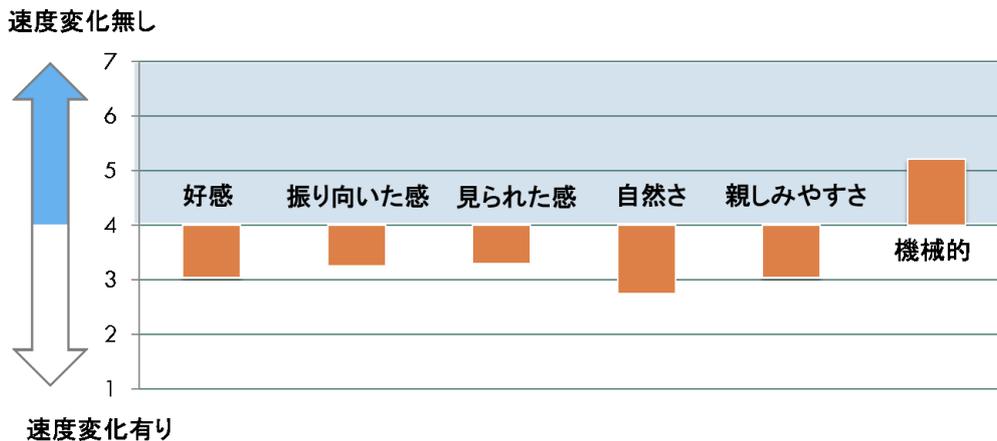


図 4.8: ロボットの振り向き印象評価結果

表 4.2: ロボットの振り向き印象評価の符号検定結果

	好感	振り向いた感	見られた感	自然さ	親しみやすさ	機械的
平均値	3.042	3.25	3.29	2.75	3.042	5.21
p 値	0.027	0.17	0.041	0.0071	0.035	0.027

4.4 頭と目の振り向き動作の自然さ評価

4.2 節で行った観察で，振り向く際に瞬きが見られた．これが，ロボットの印象にどのような影響を与えるのかは実際に調査してみなければ分からない．よって，ロボットの振り向き動作に目の動作，特に瞬きを入れることで自然さが現れるか調査を行った．

4.4.1 実験方法

セッティングは図 4.9 に示す．ロボットの前には被験者が 60° の位置にディスプレイがある．ロボットはディスプレイと被験者を交互に見ながら，ディスプレイに映し出された絵について説明する．そのときのロボットの首振り方法を 2 パターン作った．どちらか一方の首振り動作を被験者は見て，アンケートに回答した．実験が始まる前に被験者はロボットの講義を受けるよう説明を受けるだけである．

2 パターンの首振り動作について説明する．一つは，目は顔正面を向いたまま動かさず，首振りを用いてディスプレイを見る．首の回転は 60° となる．もう一方は振り向く際に瞬きをし，目と首の回転の組み合わせでディスプレイを見る．具体的には，首が 30°，目が 30° 回転する [9] ことで，合計 60° 回転となり，ディスプレイを見る．目と首は同時に回転を始め，瞬きは首が動いている最中に行われる．

アンケートは 7 段階 (1: 非常に自然でない-2: かなり自然でない-3: やや自然でない-4: どちらでもない-5: やや自然-6: かなり自然である-7: 非常に自然である) で評価してもらった．数字が大きくなると，良い評価を得たことになる．

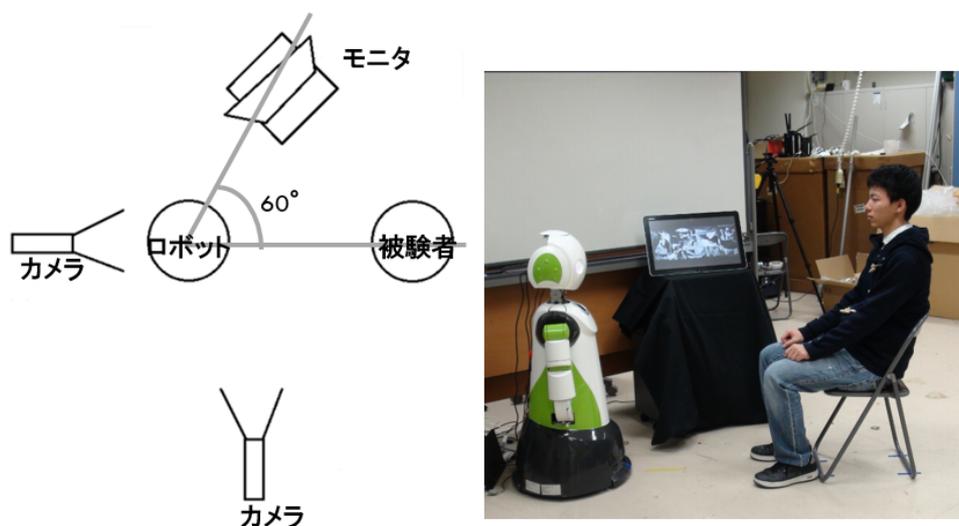


図 4.9: 頭と目の振り向き動作評価実験のセッティング

4.4.2 結果と考察

表 4.3 に結果と t 検定の結果を示す．有意差 ($p < .01$) があり，目の動きのある方がより自然であるという結果となった．

眼球動作と頭部動作の連動が人間に対して自然な印象を与えるという結果になっている．従来の研究では，どちらか一方のみを用いて視線コミュニケーションを行っていたが，自然さを求められるコミュニケーションにおいては眼球と頭部の動作を同時に考えることが重要であるように思われる．

表 4.3: 頭と目の振り向き動作の自然さ結果と t 検定の結果

	眼球動作有り	眼球動作無し
データ数	27	24
平均	5	3.958
標準偏差	0.815	1.29
t 値	3.523	
p 値	.0010	

4.5 視線コミュニケーションに適したロボットの頭

2章，3及び本章の結果を元に，Robovie-R ver.3(Vistone) に提案するロボットシステムを入れる．図 4.10 にその結果を示す．

内部機構は 3.1.1 節と同じものが入っている．ただし，鏡は使わず直接プロジェクタから投影している．目は図 2.1-A に近いものにし，顔には鼻をつけた．さらに顔向きを強く示せるよう側頭部に突起物をつけた．

Robovie-R ver.3 の頭部は，4.2 で得られた人間の頭部回転のように滑らかに動かすことができる．

これまでのロボットはカメラをロボットの目に埋め込む場合が多かった．しかし，ロボットにおいて，カメラは目の位置に存在する必要性はなく，その周辺にあれば良いと考えられる．

今回提案するロボットの頭部デザインでは，目標物がどこにあるのか捕らえることができるのであれば，カメラはどこに搭載しても良い．ロボットの頭部のさまざ

まな位置に小型カメラを埋め込んでおき，それらから得られるカメラ画像を用いて，ロボットの目の位置から見た映像を合成することもできる．今後，ロボットの頭部に多数の小型カメラを埋め込み，自由視点映像生成手法 [10] を応用して，ロボットの目の位置から任意方向を見た画像を作り出し，ロボットの目の見る機能として，システムに組み込む予定である．



図 4.10: 提案するロボットの頭部

第5章 視線による内部状態の表現

5.1 ロボットの動的な視線表現

これまでに、ロボットの親しみやすさと視線の読み取りやすさを兼ね備えた目のデザインと、ロボットの頭部全体での振る舞いについて考えてきた。しかし、視線コミュニケーションを行なうには、ロボットが何を注視しているか他者が感じ取ることができなければならない。本研究ではロボットの注視を演出するために、集中して物に視線を定めている状態に行われる注視動作と、そうではない状態に行われる待機動作の2つの動作に差を出すことで、ロボットの注視を演出することを考えた。

待機動作と一言でいっても様々な状態での待機動作が考えられる。そこで「待つ」という状態のように集中して視線を定めておらず何のタスクもない状態に行われる視線移動の待機動作について考える。

5.2 自然な待機動作の評価実験

5.2.1 実験方法

カ石らが、アンドロイドの周りにある物体、特に、新たに出現したり、移動したりした物体を注視する待機動作が自然な待機動作となることを示している [33]

そこで、自然な待機動作があることで、注視の演出をすることができるのか印象調査を行った。今回待機動作として、首が全く動かない静止状態、等速で左右に首振り、Saliency が高い箇所を見渡すの3つを作り実験を行った。

実験のセッティングは図 5.1 のようにした。被験者はロボットのいる部屋に連れていくから、後でロボットと部屋の様子を尋ねるので観察してくださいとだけ伝える。被験者はロボットから 5m 離れた位置に連れて行かれ、20 秒間待機動作をおこなうロボットがいる部屋をながめる。その後、ロボットから 1m の位置に移動する。

ロボットは人が近寄ってきたあたりで図 5.1 の四角で囲まれたものを注視する．その 5 秒後に実験を終了した．この一連の流れを撮影し，観察した．

それぞれの待機動作について詳しく説明する．静止している待機動作では，じっと正面を見続け，被験者が近寄ると図 5.1 の四角に囲まれたものを見る．等速で左右に首を振る動作では，首を等速で左右に振り続け，被験者が近寄ると図 5.1 の四角に囲まれたものを見る．Saliency の高い箇所を見渡す動作は，図 5.1 の丸で囲まれた Saliency の高いオブジェクトを見て回り，被験者が近寄ると被験者を一度見てから四角で囲まれたオブジェクトを見る．Saliency の高い箇所を見渡す動作だけ一度ロボットが被験者を見るのは，被験者が動いたことで Saliency が高くなったためである．作成した 3 つの待機動作の中では，最も自然な待機動作として Saliency の高い箇所を見渡す動作を作成している．

それぞれの動作を被験者間で実験を行った．被験者人数は静止している待機動作は 11 人，等速で左右に首を振る動作は 10 人，Saliency が高い箇所を見渡す動作は 11 人である．



図 5.1: ロボットを基点とした実験環境風景

5.2.2 結果と考察

観察を行ったところ，有意差は見られなかったが Saliency の高い箇所を見渡す動作 (54.5%)，静止している待機動作 (40%)，等速で左右に首を振る動作 (18.2%) の順にロボットの振り向きにつられた人が多かった．今回の実験では，最も自然な待機動作として Saliency の高い箇所を見渡す動作を作成している．自然な待機動作があることで注視動作との差を出すことができ，より注視を演出できる可能性がある．

待機中にロボットが静止していると、被験者が周囲を見回してロボットから目を離すことが多かった。観察する空間の中で、唯一動いていたのはロボットだけである。完全に静止しているとロボット自身の Saliency が低く、被験者の注意が向けられなかったのだと考えられる。

5.3 人間の待機動作観察実験

ロボットの注視を演出するために、集中して物に視線を定めている状態に行われる注視動作と、そうではない状態に行われる待機動作の2つの動作に差を出すことで、ロボットの注視を演出することを考えた。前節では実験でそれが有効である可能性を示した。実際の人間の待機動作はどのようなものか。待機動作と言っても様々な状態での待機動作が考えられる。何もすることがなく呆けているような状態、人が来るのを待っているような状態等である。そこで、人を待つという状態のように、一か所に集中して視線を定める必要もなく何のタスクもない状態に行われる視線移動の待機動作について考える。

コミュニケーションロボットが活躍している・活躍が期待されている現場の一つにミュージアムガイドを行うような接客の現場がある。接客の現場において、ロボットが何かに集中しておらず、タスクを頼んでも良いと人間に思わせるような待機動作をしている必要があるため、このような待機状態を選んだ。

5.3.1 実験方法

被験者に視線計測装置を着けてもらい、視線移動の待機動作を調査した。被験者には待機動作を観察するとは伝えずに別の実験で使用するという視線計測装置を装着してもらう。その後、被験者を1人実験室に残し、他の者は部屋を退出する。被験者が部屋の中に1人で待っている間の様子を観察した。

場所は研究で使用している実験室で行った。その実験環境を図5.2に示す。今回は同研究室内の生徒が行う実験の前に行ったため、このようなセッティングとなっている。被験者の正面には被験者を観察するためのカメラが設置されている。机の上には被験者正面と被験者の左方向に2つのディスプレイがある。これは後に行われる実験で使用するもので、被験者によりディスプレイの表示の有無は異なる。被験者から見て机の左横には視線計測装置から得られる動画が映されたディスプレイ、

およびそれを撮影するビデオカメラが設置されている．実験室のパノラマ画像を図 5.3 に示す．



図 5.2: 人間の待機動作観察実験環境



図 5.3: 実験室のパノラマ画像

計測装置から得られる画像を図 5.4 に示す．線が視線の軌跡を示し，白い円の大きさがその点の注視時間を表す．注視時間が長いほど，円は大きくなる．

被験者は 4 人で，全て大学工学部の男子学生である．被験者全員，実験を行った部屋に入るのは初めてであり，慣れていない．被験者を 1 人にした時間は 3 分から 4 分ほどである．



図 5.4: 視線計測装置から得られる画像

5.3.2 実験結果

視線計測装置から得られた画像と被験者を正面から撮影するカメラから得られた画像からいくつかのことが分かった。

1つ目に、待機動作中には必ず視線が戻ってくる箇所、帰着点が存在することが観察できた。帰着点が存在することを示す画像を図 5.5 に示す。図 5.5 の中に 3 枚の画像があるが、左半分が被験者を正面から撮影したカメラ画像で右半分が視線計測装置から得られた画像となっている。図 5.5 の上部の画像の右半分の画像を見ると、視線のマーカが集まっている箇所がある。これは、被験者の正面に置かれているディスプレイに映し出されたウィンドウのアドレスバー付近である。この被験者はこの点を帰着点として、視線が移動していた。しかし途中で正面に置かれているディスプレイがスリープモードに入ってしまった、画面が暗くなり帰着点が消滅してしまった。図 5.5 の中部の画像を見ると、帰着点が消滅し視線が激しく動く様子が分かる。どこかに視線が留まることなく動き続けた時間は約 20 秒で、他の被験者を見てもここまで長く何処かに留まることなく視線が動き続ける様子は確認できなかった。その後図 5.5 の下部の画像のように新たな帰着点を見つけ、そこから視線が移動するようになった。このことから、視線が戻ってくる帰着点の存在が確認できた。

帰着点の存在は確認できたが、どのようなものが帰着点になるかは分からなかった。被験者により帰着点は異なり、ディスプレイに表示された物、特に文字を帰着

点とする場合や、ディスプレイに表示があっても自身の手を帰着点とする場合もあった。

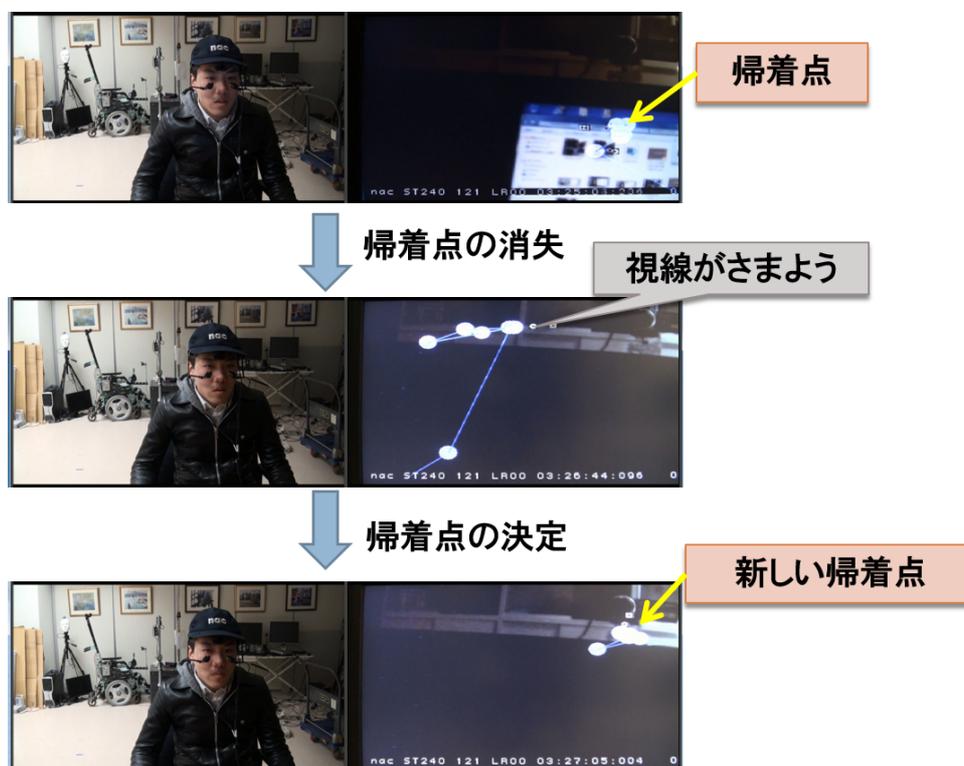


図 5.5: 帰着点の消失

2つ目に時間経過とともに周りを観察する距離が遠くなっていくことが観察できた。図 5.6 にその様子を示す。はじめは図 5.6 上部の画像右半分を示した帰着点と図 5.6 中部の画像右半分を示した近くにある物との間を視線が移動していた。時間が経つにつれて図 5.6 下部の画像右半分を示すように視線位置を示したマーカが消えた画像が撮影されるようになった。これは、眼球が大きく動き過ぎて視線計測装置による計測が不可能になってしまったためである。完全に消えてしまう直前に表示されたマーカの位置や図 5.6 下部の画像左半分からこの場合では上を向き過ぎてしまっていると考えられる。図 5.6 下部の画像右半分を見ると、近くにあるものは被験者の正面に置かれているカメラが写っており、それ以外は図 5.6 中部の画像右半分で見えていた箇所よりも遠くにあるものである。このことから、被験者は正面

に置かれているカメラよりも上で奥を見ていることが推測される．このように目を大きく動かしより広範囲を見るようになっていることが分かる．

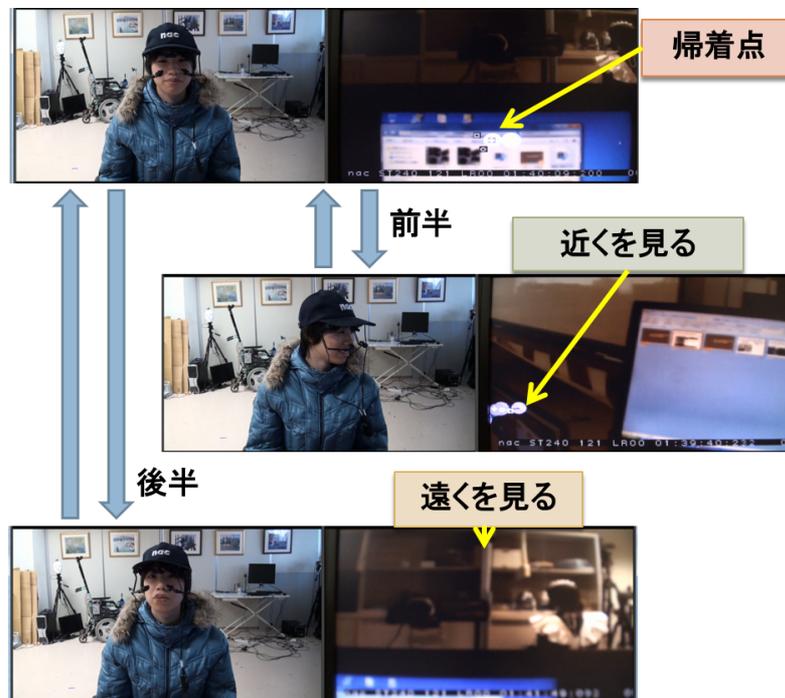


図 5.6: 時間経過により視線を送る距離が変化する様子

実験中，被験者正面に置かれたディスプレイおよび左に置かれたディスプレイに文字が表示されていると，それを読む様子が確認できた (図 5.7)．ディスプレイに表示されたアイコンに視線を送る様子はあまり見られなかった．これは全員に見られた傾向である．



図 5.7: 文字を読んでいる被験者の様子

5.3.3 考察

視線の待機動作として2つのことが確認できた。1つは視線の帰着点の存在と、もう1つは時間経過とともにより広範囲に視線を向けるようになることである。しかし、帰着点がどのようなものになるのかは、被験者によって異なること、被験者数が少ないこともあって分からなかった。慣れない環境に置かれたことで緊張し、このような結果になった可能性も否定はできない。しかし、接客のようにいつタスクを振られるか分からない状態で人を待つという待機動作ならば、今回のいつ人が戻ってくるか分からない実験設定は適切であり、得られた結果は有用であると考えられる。

また、文字があればそちらを見ることが多く、帰着点にもなっていたので、Saliencyの高い箇所として文字についても考慮する必要がある。

5.4 目の動作による表現

前節において、待機動作時の視線の動きが分かった。本節では、ロボットが行う待機動作と注視動作が人間に伝わるかどうか調査する。

5.4.1 実験方法

ロボットにポータブルゲーム機を持たせ、それに視線方向をむけたまま動かない眼球動作無しとし、ポータブルゲーム機を帰着点として視線がゲーム機から外れるほどに動かす眼球動作有を作成した。眼球動作無は注視動作を、眼球動作有は待機動作である。また、集中してものを見ているときと、そうではないときで瞬きの量が変わることが一般的に知られている。今回、ロボットの瞬きは少ないときで毎分12回、多いときで毎分40回と設定した([37]10.5.2節)。少ないときが注視時、多いときが待機時である。

瞬きと眼球動作の組み合わせで計4つの動作をつくり、それをサーストンの一対比較法で検証した。1つの動作は約30秒の動画で示し、図5.8に示すようなWebシステムを用いてアンケートを行なった。使用したWebシステムは一対比較法のために作られたものではないため選択肢が6つあるが、「絶対に左」「左」「おそらく左」が左の動画、「絶対に右」「右」「おそらく右」が右の動画を選んだものとして集計した。

質問内容としては、注視状態を尋ねるものと、待機状態を尋ねるものをつくった。
注視状態 ロボットがポータブルゲーム機で遊んでいます。左と右でどちらの方がより集中して画面を見ているですか？
待機状態 ロボットがポータブルゲーム機で遊んでいます。左と右でどちらの方が、話しかけやすいですか？

待機状態は集中して何かをみている状態ではないとしたため、ポータブルゲーム機を持っているがそれに集中していない状態であるとし、このような質問にした。「瞬き少+眼球動作無」が注視動作、「瞬き多+眼球動作有」が待機動作を想定している。両質問の回答者はそれぞれ別の被験者を用意した。被験者は、注視状態では20代男女13人、待機状態では20歳前後の男女20人である。



図 5.8: 動画を用いたアンケートを行なう Web システム

5.4.2 結果と考察

注視動作の集計結果を図 5.1，待機動作の集計結果を図 5.2 に示す。注視状態の評価においては、得票数が 0 となる組み合わせができてしまったため分析ができなかったが、図 5.1 を見ると瞬きが少なく眼球動作がある物をもっとも選ばれている。待機動作については、CaseV で尺度構成した。その結果を図 5.9 及び、表 5.3 に示

す。CaseV モデルで尺度構成を行い、その x^2 適合検定を行ったところ表 5.4 のようになり適合していることが分かる。図 5.9 を見ると、「瞬き多+眼球動作有」が待機動作として一番選ばれるとの予想とはことなり、「瞬き少+眼球動作有」が一番選ばれ「瞬き多+眼球動作有」は二番目であった。図 5.9 を見ると、眼球動作の有無で開きがあり、眼球動作があるものが待機動作としては良いという結果となった。眼球動作の有無が印象を分けているように読み取れる。これは、眼球動作があることで瞬きの量の違いに被験者の意識が向きづらかった可能性がある。しかし、待機動作を調査する質問では想定と異なったが、注視動作を調査する質問での結果では「瞬き多+眼球動作有」が最も選ばれていない。選ばれていないということは、最も注視しているようには見えなかったということで、適切な待機動作であると考えることができる。このことから、質問文が適切ではなかった可能性もある。どちらにせよ眼球動作があることで、ロボットへ今話しかけても良いという印象を人間に与えることができる結果となった。

今回、注視を想定した動作と待機を想定する動作を作成し、待機動作と注視動作を調査する質問を行った。それぞれの質問の結果は、ほぼ真逆となっている。注視動作と待機動作の差を作ることができた。

表 5.1: 眼球動作と瞬きの組み合わせによる一対比較集計結果 (注視動作)

	瞬き多 + 眼球動作有	瞬き少 + 眼球動作有	瞬き多 + 眼球動作無	瞬き少 + 眼球動作無
瞬き多+眼球動作有		11	11	10
瞬き少+眼球動作有	2		9	13
瞬き多+眼球動作無	2	4		10
瞬き少+眼球動作無	3	0	3	
計	7	15	23	33



図 5.9: サーストンの一対比較を用いた待機動作の印象評価結果グラフ

表 5.2: 眼球動作と瞬きの組み合わせによる一対比較集計結果 (待機動作)

	瞬き多 + 眼球動作有	瞬き少 + 眼球動作有	瞬き多 + 眼球動作無	瞬き少 + 眼球動作無
瞬き多+眼球動作有		9	10	7
瞬き少+眼球動作有	11		5	7
瞬き多+眼球動作無	10	15		9
瞬き少+眼球動作無	13	13	11	
計	34	37	26	23

表 5.3: サーストンの一対比較法 case V モデルにより算出した尺度値 (待機動作)

	瞬き多 + 眼球動作有	瞬き少 + 眼球動作有	瞬き多 + 眼球動作無	瞬き少 + 眼球動作無
尺度値 (瞬き少+眼球動作無=0)	0.352	0.458	0.0869	0

表 5.4: サーストンの一対比較法のモデルに対する x^2 適合検定 (待機動作)

	Case V
自由度	3
x^2 値	2.721
x^2 分布 (5%)	7.815

第6章 結論

6.1 ロボットの視線表現のまとめ

本研究ではロボットの視線表現を行うために、目の外見といった静的な視線表現、目の動かし方といった動的な視線表現の2つに分けて考えた。

先に静的な視線表現について調査を行った。視線コミュニケーションは、人間を対象とした認知科学的な研究からインタラクションやインタフェースへの応用まで、様々なレベルで視線が研究対象とされている。しかし、目や顔のデザインはデザイナーや開発者にまかされており、比較的デザインが自由なロボットの目を対象として、体系だった目や顔のデザインの調査は行われていなかった。視線コミュニケーションを行う上で、視線の読み取りやすい目ということを考えることは重要である。また、コミュニケーションにおいて親しみやすいデザインをした目が必要である。そこで「親しみやすさ」と「視線の読み取りやすさ」が視線コミュニケーションにおいて必要だという観点から、この2つを持った目のデザインの体系だった調査を行った。Kobayashiら [8] の用いていた指標と人間の目の調査結果を基準とし、目の横幅に対する目の縦幅を3段階、目の横幅に対する黒目の直径を3段階に変化させ、それらを組み合わせることで9個のデザイン候補を作成し、親しみやすさと視線の読み取りやすさについて調査を行った。

親しみやすさは、サーストンの一対比較法を用いて調査を行なったところ、目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じまたはそれ以上に縦幅がある(本研究では丸のもの)と良く、露出している黒目と白目の面積を比較すると、黒目の面積が白目の面積と同じかそれよりも大きい目が良いと思われるような結果となった。しかし、この実験は日本語の質問文で日本人に対して行ったものである。そこで、英語を母国語とする留学生に対し、質問文を英語に訳した同様の実験を行った。その結果は、順位は異なるが、日本人と同様に、目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じまたはそれ以上に縦幅がある(本研究では丸のもの)と良く、露出している黒目と白目の面積の比率が、黒目の面積が白目の面積と同じかそれよりも大きい目が良いと思われるような傾向は見られた。しかし、留学生では目の横幅に対する目の

縦幅の比率が人間に近い目の方が良いという結果になった。瞼間距離が長い目というものは日本国内のアニメや漫画のキャラクターでよく見られる傾向であり、日本人にとって見慣れていることが原因と考えられる。また、日本人の被験者数が105人に対し留学生の被験者数が29人と少なかったこと、選ばれた確立が0と1となってしまう組み合わせもあり、親しみやすい目の順位が異なるのはデータ数が原因なのか、文化差が原因なのか、本研究でははっきりと分からなかった。

視線の読み取りやすさについては、作成した目のデザイン候補を用いて視線の読み取りやすさを調査した。その結果、黒目の直径が目の横幅に対する比率でいうと、人間と同じくらいまたはそれ以上の直径を持つと読み取りやすくなるという結果となった。露出している黒目と白目の面積を比較すると、黒目の面積が白目の面積と同じかそれよりも大きい目が、視線が読み取りやすくなるような傾向があった。露出している黒目の面積が露出している白目の面積と同じかそれよりも大きい目では、黒目は上下の瞼と接している。それにより、黒目が移動することで黒目を境として左右の白目の面積変化が現れることになる。これは、人は視線を読み取る際、その目領域内の明度差の分布を手掛かりとしている Ando ら [1] の主張と合致する。黒目を境とした露出した左右の白目の面積変化が起こることで、視線が左右のどちらかを見ているだけでなく、より具体的な方向を人間に伝えることができたのではないかと考えられる。黒目を動かす様子を見せる場合と見せない場合での視線の読み取りやすさの調査結果では、黒目を動かす方が読み取りやすいという結果も、やはり露出している白目の面積変化がより分かりやすかったからではないかと考える。視線の読み取りやすさでは、目のデザインだけではなく顔のデザインについても調査を行った。人間の顔を用いた視線の読み取りやすさや、人間の顔を模したマスクを用いた視線の読み取りやすさを扱った研究はこれまでもされている。しかし、人間の顔の要素については言及されていなかった。本研究では人間の顔から視線が読み取りやすくなる要因が鼻にあると考え、平面の顔・半球の顔・人間でいう鼻にあたる三角形の突起を半球の中央につけた顔の3つをつくり、視線の読み取りやすさについて調査を行った。その結果、やはり鼻がある半球の中央に三角形の突起をつけた顔がもっとも視線が読み取りやすくなるという結果になった。

静的な視線表現として、親しみやすさと視線の読み取りやすさ両方を兼ね備えた目のデザインでなければならない。今回の結果としては、目のデザインは目の横幅に対する目の縦幅の比率が人間と同じ、またはそれ以上に縦幅があり、露出している黒目の面積が露出している白目の面積と同じかより大きいものが良いという結果となった。また、人間でいう鼻にあたるもの凹凸を持つ顔は視線が読み取りやすくなることが分かった。

動的な視線表現について調査を行った。自然な動作ができなければ、初めてロボッ

トと相対する場合に人間がロボットの状態を理解することができない。また、自然な動作として人間の動作を完全に模倣することは、今後様々なロボットへと実装することを考えると非効率的である。そして自然な動作と同様に視線コミュニケーションにおいて大切なことは、ロボットが何を注視しているか他者が感じ取ることができるかなければならない。ロボットと人間の間で行われる視線コミュニケーションの有用性が示されているが、ロボットが何かを見ているという前提で行われている。そこで、動的な視線表現として、眼球動作と頭部動作の連動を考慮した全体としての視線の自然な動作、ロボットが注視しているという内部状態を眼球動作によってどのように表現すれば良いか調査を行った。

まず、ロボットにて本格的な実験を行う前に、機械の目とCGの目で比較を行った。その結果、CGの目には見ている感、表現力があるという結果となった。また、機械の目とは異なり駆動音がしないこと、機械の目よりも早く動かせることもあり、今後の実験ではCGの目を使っていくことにした。

視線の自然な動作としては、人間の動作を観察し、その中から要素を抽出してそれを元に眼球動作と頭部動作、そしてその2つの連動について検討した。人間の視線配布動作を観察したところ、頭部回転をするときに瞬きをすること、頭部回転は加速し減速するという速度変化があることが分かった。速度変化が人間の滑らかな動きを作り出しているため、自然な動作をロボットで再現するには重要な要素であると考えられる。また、振り向く際に瞬きをするという点については、これが人間にどのような印象を与えるか調査してみなければ分からない。そこでまず、速度変化のある首振りがどのような印象を与えるのか、速度変化の有る首振りと無い首振りをロボットへと実装し、ロボットの振り向き印象評価を行った。その結果、速度変化のある首振りは好感、振り向いた感、見られた感、自然さ、親しみやすさがあることが分かった。次に、瞬きを踏まえた頭と目の振り向き動作の自然さ評価を行った。その結果、加速減速する頭部回転と、頭部回転を行う際に瞬きをし、眼球回転角度と頭部回転角度を組み合わせ対象物を見る動作を作成したところ、自然であるという印象を与えることができた。

視線による内部状態の表現としては、集中して物に視線を定めている状態に行われる注視動作と、そうではない状態に行われる待機動作の2つの動作に差を出すことで、ロボットの注視を演出することを考えた。ロボットの待機動作と注視動作を作り、ロボットが注視を演出できるか調査を行った。待機動作としては、Saliencyの高い場所に反応する待機動作が自然な印象を与えるとカ石らが発表している[33]。そこで、全く動かない、頭部を等速で左右に振る、Saliencyの高い場所に反応するという3つの待機動作を作成し、待機動作から注視動作へ移るロボットを被験者に見せ、その際の被験者の様子を観察した。その結果、有意差は出なかったものの、

Saliency の高い場所に反応する待機動作から注視動作へ移った動作を見た被験者は、ロボットの注視したその5秒以内にロボットの注視対象物へ視線を向けるという傾向が見られた。これにより、自然な待機動作があることで注視動作との差を出すことができ、より注視を演出できると考えた。そこで、より自然な待機動作を、人間を元に作成するため、人間の待機動作観察を行った。待機動作と一言でいっても様々な状態での待機動作が考えられる。本研究では、人を待つという状態のように集中して視線を定めておらず何のタスクもない状態に行われる視線移動の待機動作について観察した。そうしたところ、被験者は視線が戻る位置がある状態で周囲を観察するような動作を行い、時間が経つにつれ遠くを見るようになった。ロボットの待機動作として視線が戻る位置がある状態で様々な方向へ眼球が動く動作、注視動作として全く眼球が動かない動作の2つを作成した。また、集中状態によって瞬きの量が変わることが知られている。そのため、集中時の瞬きと非集中時の瞬きを想定した2つの量の瞬きを用意し、作成した動作と組み合わせてロボットの注視動作と待機動作の印象評価をサーストンの一対比較法にて行った。その結果、注視動作としては瞬きが少なく目が動かない、待機動作としては目が動く方が良いことが分かった。また、サーストンの一対比較法では尺度値で順位付けを行うが、注視動作と待機動作の結果は、ほぼ真逆の順位となっている。このことから、注視動作と待機動作の差を作ることができた。

6.2 将来の展望

視線コミュニケーションには、相手の視線を獲得するためにアイコンタクトが重要となってくる。よってアイコンタクトの確立ができるようになる必要がある。佐藤が、人間が「見られている」と感じる水平方向の視線偏移角について調査している[29]。それによると、距離に関わらず、正面顔において視線の偏移角が0度で100%「見られている」と感じ、左右約5度で「見られている」と感じる割合が半値となることを示している。今回、注視を演出するため、注視動作と待機動作に差を作り、注視を演出した。人間に「見られている」という印象を与え、アイコンタクトが確立することを考える。

ロボットの頭部回転について、今回は主に眼球動作について考えてきた。だが、実際の注視には頭部の回転が伴う場合が多い。共同注視の成立について小林が調査したところ、成人は相手の目を見るのではなく顔や体の向きから認識していると推測される場合が多いこと、幼児の場合では相手を見てから注視対象へと視線が向かうが成人の場合ではいきなり対象物へと視線が向かうパターンが多かった[26]。これは、眼球動作以外の要素も重要であることを示している。4.4節からも眼球動作

と頭部動作の連動が重要であることを示す結果が得られている．注視を演出するためには，頭部動作との連動をきちんと考える必要がある．

今回，コミュニケーションロボットへ実装するパーツとしての外観や動作について調査を行ってきた．しかし，実際にコミュニケーションを行っている状況での調査は行っていない．ロボットへ今回の成果を実装し，実際にコミュニケーションを行わせた場合，想定したもの以外の影響も当然出てくる可能性がある．それを確認するためにも，ガイドロボット等へ実際にコミュニケーションを行うロボットへ統合を目指す．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，ご指導を賜りました久野義徳教授に厚く深く御礼申し上げます．

また，本研究を進めるにあたり，貴重なアドバイスを賜りました小林貴訓准教授に心より御礼申し上げます．

CREST のミーティングを通じて，東京大学 佐藤洋一教授をはじめとした，埼玉大学以外の先生方からも様々なご意見を伺うという大変貴重な機会をいただきましたこと，厚く御礼申し上げます．

ロボット頭部作成において，電気通信大学 児玉幸子准教授をはじめとする児玉研究室の皆様には，他大学にも関わらずお力添えいただいたこと，心より感謝いたします．

実験においては，被験者の確保および実験のための時間と人員の手配をくださった山崎敬一教授を初めとした山崎研究室の皆様には大変お世話になり，感謝申し上げます．

また，観察実験にご協力いただきました埼玉大学学生の皆さまに感謝いたします．

研究生生活の全般においては，久野研究室の先輩方，同期，後輩の皆様には大変お世話になりました．深く感謝いたします．

私を温かく見守っていただいた両親，常に励ましてくれた姉に心より深く感謝します．

最後に改めて，今まで研究を支えてくださった全ての方々に，心より深く厚く御礼申し上げます．

2016年9月 小貫朋実

参考文献

- [1] S. Ando, “Perception of gaze direction based on luminance ratio,” *Perception*, vol.33, pp 1173-1184, 2004.
- [2] M. Blow, K. Dautenhahn, A. Appleby, C. L. Nehaniv, and D. C. Lee, “Perception of robot smiles and dimensions for human-robot interaction design,” *Roman2006*, pp.469-474, 2006.
- [3] Communication robot PaPeRo: Communication robot PaPeRo: Product — NEC, <http://jpn.nec.com/robot/>
- [4] F. Delaunay, J. Greeff, and T. Belpaeme, “A study of a retro-projected robotic face and its effectiveness for gaze reading by humans,” *Proc.HRI2010*, pp.39-44, 2010.
- [5] A. Doshi, and M. M. Trivedi, “Head and gaze dynamics in visual attention and context learning,” *CVPR Workshops 2009*, pp.77-84, 2009.
- [6] S. Holm, “A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian journal of statistics*,” vol. 6, no. 2, pp.65-70, 1979.
- [7] A. Kendon, “Some functions of gaze direction in social interaction,” *Aca Psychophysica*, vol.25, pp.22-63, 1967.
- [8] H. Kobayashi, and S. Kohshima, “Unique morphology of the human eye and its adaptive meaning: comparative studies on external morphology of the primate eye,” *Journal of Human Evolution* 2001, vol40, pp.419-435, 2001.
- [9] Y. Kondo, M. Kawamura, K. Takemura, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, “Gaze motion planning for android robot,” In *Human-Robot Interaction (HRI)*, 2011 6th ACM/IEEE International Conference on. IEEE, pp.171-172, 2011.

- [10] M. Levoy and P. Hanrahan, “Light field rendering,” Proc.SIGGRAPH’96, pp.31-42, 1996.
- [11] Logicool 2-MP Portable Webcam C905: **ポータブル ウェブカメラ C905-Logicool サポート**,
http://support.logicool.co.jp/ja_jp/product/portable-webcam-c905
- [12] K. Misawa, Y. Ishiguro, and J. Rekimoto, “Ma petite cherie: What are you looking at?: A small telepresence system to support remote collaborative work for intimate communication,” Proc.AH2012, no.17, 2012.
- [13] M. Mori, “The Uncanny Valley,” Energy, vol.7, no.4, pp.33-35, 1970.
- [14] B. Mutlu, J. Forlizzi, and J. Hodgins, “A storytelling robot: Modeling and evaluation of human-like gaze behavior,” Proc.HUMANOIDS ’06, pp.518-523, 2006.
- [15] Robovie-R3: Robovie-R3 (ロボビー アールスリー) — ヴイストーン株式会社,
http://www.vstone.co.jp/products/robovie_r3/index.html
- [16] M. Saerbeck, and B. Christoph, “Perception of affect elicited by robot motion,” Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, IEEE Press, pp.53-60, 2010.
- [17] C. L. Sidner, C. Lee, C. D. Kidd, and C. Rich, “Explorations in engagement for humans and robots,” Artificial Intelligence, vol.166, pp.140-164, 2005.
- [18] SHOWWX+: SHOWWX Pico Projectors - MicroVision, Inc.,
<http://www.microvision.com/product-support/showwx/>
- [19] L. L. Thurstone, “Psychophysical analysis,” The American Journal of Psychology, vol.38, no.3, pp.368-389, 1927.
- [20] K. Tsukida and M. R. Gupta, “How to analyze paired comparison data,” No. UWEETR-2011-0004, Washington University, Seattle, Department of Electrical Engineering, 2011.
- [21] Wii リモコンプラス: Wii | コントローラ,
<https://www.nintendo.co.jp/wii/controllers/index.html>

- [22] A. Yamazaki, K. Yamazaki, Y. Kuno, M. Burdelski, M. Kawashima, and H. Kuzuoka, "Precision timing in human-robot interaction: coordination of head movement and utterance," Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.131-140, 2008.
- [23] 板倉 昭二, 遠藤 利彦, 大神 英裕, 荻野 美佐子, 小沢 哲史, 小林 洋美, 千住 淳, 竹下 秀子, 橋彌 和秀, 長谷川 寿一, 別府 哲, 読む目・読まれる目, 遠藤利彦 (編), 東京大学出版会, 2005.
- [24] 大森慈子, "面接者の態度が被面接者の瞬目と心拍に与える影響," 仁愛大学研究紀要, vol.6, pp.31-39, 2007.
- [25] 大森慈子, 山田富美雄, 宮田洋, "対人認知における瞬目の影響," 社会心理学研究, vol.12, no.3, pp.183-189, 1997.
- [26] 小林春美, "共同注視成立時の視線移動," 東京電機大学総合研究所年報, vol.23, pp.219-222, 2004.
- [27] 小孫康平, "瞬目の多少が人の印象形成に及ぼす影響," 日本教育工学会論文誌, vol.30, pp.1-4, 2006.
- [28] 佐手 一裕, 児玉 幸子, 東 傑, "バーチャルキャラクターの眼球表現手法に関する研究: 心理・生理的応答に基づくインタラクションモデルの提案," Technical Report of Information and Communication Engineers HIP2005-41, pp117-122, 2005.
- [29] 佐藤隆夫, "「目が合う」ことの謎: アイコンタクトの実験心理学的検討," 電子情報通信学会技術研究報告, HIP, ヒューマン情報処理, vol.102, no.472, pp.13-18, 2002.
- [30] 園山 隆輔, "ロボットデザイン概論," 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [31] 大坊 郁夫, "対人コミュニケーションの社会性," 対人社会心理学研, vol.1, pp.1-16, 2001.
- [32] 田中裕, "覚醒水準と瞬目活動," 心理学研究, vol.70, no.1, pp.1-8, 1999.
- [33] 力石 武信, 中村 泰, 松本 吉央, 石黒 浩, "アンドロイドの自然な待機動作生成のための視線制御," 第13回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp.206-211, 2008.
- [34] 中川志信, ROBOTICS DESIGN ロボティクスデザイン, 美術出版社, 2012.

- [35] 畑田豊彦, “情報受容と視野特性の計測,” 人間工学, vol.29, No.Supplement pp.86-88, 1993.
- [36] パロ: 株式会社 知能システム,
<http://intelligent system.jp/>
- [37] 福田 忠彦, 生体情報システム論, 産業図書, 1995.
- [38] 室 彰浩, 佐藤 隆夫, “CG 顔を用いた視線方向知覚の検討,” Technical Report of Information and Communication Engineers MVE2005-1, vol.105, no.106, pp.1-6, 2005.

発表文献

学術雑誌・論文

- T. Onuki, T. Ishinoda, E. Tsuburaya, Y. Miyata, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Designing robot eyes for communicating gaze,” *Interaction Studies*, vol.14, no.3, pp.451-479, 2013.
- T. Onuki, K. Ida, T. Ezure, T. Ishinoda, K. Sano, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Designing robot eyes and head and their motions for gaze communication,” 10th International Conference on Intelligent Computing (ICIC2014), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, vol.8588, pp.607-618, 2014. Best Paper Award.
- M. M. Hoque, T. Onuki, E. Tsuburaya, Y. Kobayashi, Y. Kuno, T. Sato and S. Kodama, “An empirical framework to control human attention by robot,” R. Koch and F. Huang, *ACCV '10 Proceedings of the 2010 international conference on Computer vision - Volume Part I*, Springer-Verlag, pp.430-439, 2010.
- M. M. Hoque, T. Onuki, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Effect of Robot’s Gaze Behaviors for Attracting and Controlling human Attention,” *Advanced Robotics*, vol.27, no.11, 2013.

国際会議

- T. Onuki, T. Ishinoda, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Designing Robot Eyes for Gaze Communication,” *Frontiers of Computer Vision (FCV2013) Workshop*, 2013.
- T. Onuki, T. Ishinoda, Y. Kobayashi, Y. Kuno, “Design of Robot Eyes Suitable for Gaze Communication,” *HRI2013 Late-breaking Reports*, 2013.
- T. Onuki, T. Ezure, T. Ishinoda, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Static and dynamic robot gaze expressions to communicating with humans,” *The 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2014)*, 2014.

- M. M. Hoque , T. Onuki, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Controlling human attention through robot’s gaze behaviors,” HSI2011, pp.195-202, 2011.
- M. M. Hoque , T. Onuki, E. Tsuburaya, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Controlling human attention by robot’s behavior depending on his/her viewing situations,” ICSR2011, 2011.
- M. M. Hoque , T. Onuki, D. Das, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Attracting and controlling human attention through robot’s behaviors suited to the situation,” HRI2012, pp.149-150, 2012.
- M. Hoque, D. Das, T. Onuki, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “An integrated approach of attention control of target human by nonverbal behaviors of robots in different viewing situations,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), pp.1399-1406, 2012.
- D. Das, M. Hoque, T. Onuki, Y. Kobayashi and Y. Kuno, “Vision-based attention control system for socially interactive robots,” 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2012), 2012.

国内会議・研究会

- 小貫 朋実, 圓谷 恵美, 小林 貴訓, 久野 義徳, “自然な動作で人間の注視を獲得するロボット頭部動作の検討,” 電子情報通信学会総合大会, pp.150, 2011.
- 小貫 朋実, 宮田 雄規, 小林 貴訓, 久野 義徳, “親しみやすさと視線コミュニケーション機能を考慮したロボットの目のデザイン,” HAI2011, pp.II-1A-4, 2011.
- 小貫 朋実, 宮田 雄規, 小林 貴訓, 久野 義徳, “視線コミュニケーションを考慮したロボット頭部の開発,” 画像センシングシンポジウム (SSII2012), ppIS4-08-1 - IS4-08-6, 2012.
- 小貫 朋実, 江連 智香, 石野田 貴文, 小林 貴訓, 久野 義徳, “注視を演出するコミュニケーションロボット,” 第19回画像センシングシンポジウム (SSII2013), pp.DS2-05, 2013. Demo.
- 圓谷 恵美, 小貫 朋実, 小林 貴訓, 久野 義徳, “親しみやすさと視線の読みとりやすさを兼ね備えたロボットの目のデザイン,” 電子情報通信学会総合大会, pp.II-1A-4, 2011.
- 佐野要, 小貫朋実, 井田賢人, 小林貴訓, 久野義徳, “人の注視を誘導する目と連動したロボットの振り向き動作の検討,” 2014年電子情報通信学会総合大会, pp.156, 2014.