

NAIST-IS-MT1551116

修士論文

アイコンタクト実現のためのアンドロイドの眼球運動の キャリブレーションと視線生成

湯口 彰重

2017 年 3 月 16 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

湯口 彰重

審査委員：

小笠原 司 教授	（主指導教員）
萩田 紀博 教授	（副指導教員）
高松 淳 准教授	（副指導教官）
丁 明 助教	（副指導教官）

アイコンタクト実現のためのアンドロイドの眼球運動の キャリブレーションと視線生成*

湯口 彰重

内容梗概

コミュニケーションロボットとして様々な用途が期待されているアンドロイドは人間に酷似した外観を持つ。人間に酷似した外観を持つロボットは、より高度なコミュニケーション能力を持っているように感じられる。またアンドロイドは、人間のような装飾された眼球を動かして視線を生成することができる。視線はノンバーバルコミュニケーションにおいて重要な意味を持ち、特にアイコンタクトは高度なコミュニケーションを行う際に用いられる。ノンバーバルで高度なコミュニケーションを期待され、かつ視線の生成が可能なアンドロイドはアイコンタクトの実現が必要だと考えられる。そのために、アンドロイドの視線を任意の方向に正確に制御する必要がある。しかし、アンドロイドは制御性が高くない空気圧アクチュエータを用いていることや眼球部の瞳の正確な位置が不明確で、さらに一般的なアンドロイドではサイズとスペースの制限からカメラのような外界計測可能なセンサが内蔵されていないという問題があった。

そこで本論文では、アンドロイドの眼球運動のキャリブレーション方法を提案し、正確な視線の生成を実現する。まず、アンドロイドの眼球姿勢を運動学で算出する頭部姿勢と外部のセンサから計測する視線方向対象をの姿勢の情報から間接的に計測する。次に、空気圧アクチュエータの制御器をモデル化し、入力となる眼球姿勢と出力となる空気圧アクチュエータの指令値から作成した対応データリストからパラメータ推定を行う。最後に精度評価実験では、人間の視線とアンドロイドの視線に対する視線知覚を比較し、一部の精度においては提案手法の有効性を確認した。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1551116, 2017 年 3 月 16 日.

キーワード

アンドロイド，視線，アイコンタクト，キャリブレーション，視線知覚

Gaze Calibration and Generation for an Android to Make Eye Contact with a Human*

Akishige Yuguchi

Abstract

Androids are used as communication robots due to their human-like appearance and their ability to generate gaze motions. Previous research shows that robots having an appearance closely resembling humans seem to have a higher level of communication ability. Also, androids can generate a gaze by moving eyeballs like humans. Gaze has an important meaning in nonverbal communication. In particular, eye contact is used for advanced communication. It is thought that achieving eye contact is necessary for androids which are expected to perform advanced interaction with nonverbal gaze communication. Thus, it is required to accurately control androids' gaze in each directions. However, androids use pneumatic actuators which are hard to control and the precise position of the eyeball pupil is usually unclear. Furthermore, for general androids, the sensors that can measure the external environment like cameras are not built in the eyes due to limitations of size and space.

In this paper, we propose a gaze calibration method for an android that can generate a gaze direction. First, we indirectly measure the android's eyeball pose from the android's head pose calculated by head kinematics and the gaze direction object's pose measured using the external sensors such as motion capture devices. Second, we model pneumatic actuator controller between outputs as actuator values and inputs as the eyeballs' angle and make data lists between the inputs and the outputs to estimate the parameters of the controller. In the

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1551116, March 16, 2017.

experiment, we conduct the experiment which is a comparison of subject's gaze perception to android and to human, as one of evaluation the proposed method. We confirmed the evaluation of the proposed method in some accuracy.

Keywords:

android, gaze, eye contact, calibration, gaze perception

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	2
1.3	研究目的	3
1.4	本論文の構成	3
第 2 章	提案手法の概要	4
2.1	対象とするアンドロイドシステム	4
2.2	提案手法のアプローチ	7
第 3 章	アンドロイドの眼球姿勢の計測方法	9
3.1	アンドロイド頭部の運動学	9
3.1.1	提案する運動学モデル	9
3.1.2	頭部動作生成実験	10
3.2	外界状況の計測	11
3.3	アンドロイドの眼球姿勢の表現方法	14
第 4 章	眼球姿勢とアクチュエータ指令値のキャリブレーション	16
4.1	計測環境	16
4.2	空気圧アクチュエータの制御器のモデル化	19
4.3	対応データの作成	19
4.4	回帰分析によるパラメータ推定	23
4.4.1	回帰直線の推定	23
4.4.2	回帰分析の評価	23
4.5	視線生成実験	27
第 5 章	キャリブレーション結果の精度評価実験	29
5.1	実験目的	29
5.2	実験の流れ	29

5.3	実験条件	31
5.4	実験結果	33
5.5	考察	37
第 6 章	おわりに	39
6.1	本論文のまとめ	39
6.2	今後の課題と展望	40
謝辞		41
参考文献		42

目次

2.1	Actroid-SIT	5
2.2	Hardware configuration of the android	6
2.3	Overview of the proposed gaze calibration method	8
3.1	Kinect for Windows v2	10
3.2	Experimental results of head motion generation	12
3.3	A camera as a gaze direction object with reflective markers . . .	13
3.4	A laser pointer device using two laser pointers as a gaze direction object with reflective markers	13
3.5	The relations between each coordinate system	15
4.1	Measurement environment using a camera	17
4.2	Measurement environment using a laser pointer device	17
4.3	The android is looking directly into the camera	18
4.4	The android's pupils are irradiated with the laser pointer device	18
4.5	Scatterplot of yaw angles vs actuator value in eyes' yaw using a camera	21
4.6	Scatterplot of pitch angles vs actuator value in eyes' pitch using a camera	21
4.7	Scatterplot of yaw angles vs actuator value in eyes' yaw using the laser pointer device	22
4.8	Scatterplot of pitch angles vs actuator value in eyes' pitch using the laser pointer device	22
4.9	Calibration results of eyes' yaw using a camera	25
4.10	Calibration results of eyes' pitch using a camera	25
4.11	Calibration results of eyes' yaw using a laser pointer device . . .	26
4.12	Calibration results of eyes' pitch using a laser pointer device . .	26
4.13	Results of gaze generation in eyes' pitch using a camera	28
4.14	Results of gaze generation in eyes' pitch using a camera	28

5.1	Experiment environment	30
5.2	Measurement environment for an android using 5 cameras . . .	32
5.3	Measurement environment for a human using 5 cameras	32
5.4	Bar graph of accuracy results	34
5.5	Comparison of android and human between the average of ac- curacy	35
5.6	A gaze sample of the android in the case of -5°	38
5.7	A gaze sample of the android in the case of -10°	38

表目次

4.1	Correlation coefficient results	20
4.2	T-test results of correlation coefficient	20
4.3	T-test results of simple linear regression	24
4.4	Coefficient of determination results	24
5.1	Accracy results [%]	33
5.2	Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of -10°	35
5.3	Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of -5°	36
5.4	Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 0°	36
5.5	Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 5°	36
5.6	Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 10°	36
5.7	Comparison of android and human between true/false numbers of subject's answers	37

第 1 章 はじめに

1.1 研究背景

アンドロイドはコミュニケーションロボットとしての様々な利用を期待された人型ロボットである [1]. アンドロイドは外観が人間に酷似している特徴を持つロボットである. 人間に酷似した外観を持つロボットは, そのような外観を持たないロボットに比べて, より高度なコミュニケーション能力を持っているように感じられることが Krach らの研究 [2] によって知られている.

またアンドロイドは, 人間の眼球に酷似した装飾が施された眼球を動かすことが可能である. 眼球の方向によって得られる視線はノンバーバルなコミュニケーションツールとして人間同士でのコミュニケーションにおいて重要な意味を持つ [3, 4]. コミュニケーション時に自分の視線と相手の視線が合うアイコンタクトはノンバーバルコミュニケーションにおいて重要な役割を果たしている [3]. 人間はこのアイコンタクトによって, 自分の発言が相手にどのように受け取られているかを知るために情報を探し求めたり, 他の誰かが話すときにサインを送るといったコミュニケーションを調整する [5, 6, 7] といった高度なコミュニケーションを日頃行っている.

したがって, 高度でノンバーバルなコミュニケーションを期待されるアンドロイドではアイコンタクトの実現が必要であると考えられる. 実際に, Shimada らは人間とアンドロイド間のノンバーバルコミュニケーションにおけるアンドロイドのアイコンタクトの有効性を確認した [8].

しかし, この研究ではアイコンタクト時の視線の生成方法については述べられていなかった. そこで, アンドロイドと人間とのアイコンタクトの実現, つまり視線を合わせるには, まずアンドロイドの視線を人間の方向に向ける必要があり, 任意の視線方向へアンドロイドの眼球部と頭部を正確に制御する能力が求められると考えている. しかし, Harada らは空気圧アクチュエータを用いたアンドロイドの問題点として制御の正確性が電動サーボモータなどより低いことを挙げられる [9]. 加えて, 視線の生成に主となるアンドロイドの眼球部の装飾が施された瞳の正確な位置が不明であった. また, サイズとスペースの関係から頭部内にカメラのような

外界を計測できるセンサが内蔵されてなかった．よって，アンドロイドの視点から外界状況を計測し，その計測結果に基づいてアンドロイドの眼球を正確に制御することが不可能であった．

1.2 関連研究

アンドロイドの視線生成に関する研究や開発は今までいくつか行われてきた．Kondo らは頭部と眼球部の分担比と，輻輳に基づいた頭部眼球動作による視線生成方法を提案した [10]．しかし，輻輳に基づいた視線生成は，距離情報が必要となる任意の注視対象への視線生成手法であるため，アイコンタクトに必要な距離情報が不要かつ任意の視線方向だけの眼球運動の制御には適用できないと考えられる．

山森らはアンドロイドの眼球運動が静止時とサッケード動作時でのアイコンタクトの成立条件を調べた [11]．しかしこの研究では，眼球運動が健常かどうか調べるためのサッケード動作という日常的な視線コミュニケーションではあまり用いられない動作時について実験していることや，さらにアイコンタクトを実現するための視線の生成手法もしくはモデルの提案までには至ってなかった．

一方で，ジェミノイドを基に特別に開発された，産業総合技術研究所のアクトロイド F[12, 13] には，アンドロイドの眼球部に外界状況を計測できるカメラが内蔵されている．しかし，Palinko らは，アンドロイドの眼球部のプラスチックのカバーによって，その背後にあるカメラから取得する画像がボケてしまうことを報告している [13]．

さらに，最新のアンドロイドである，ERICA[15] もまた眼球部に人間の顔をトラッキングするカメラを内蔵している．Even らは，この ERICA を使って，距離センサや音源位置推定マイクロフォンアレイを組み合わせたセンサネットワークを使ったアイコンタクトのための視線制御方法を提案している [16]．しかし，この研究においても，アイコンタクトを実現するためにはキャリブレーションが必要であることを示唆している．

1.3 研究目的

本論文では、任意の視線方向への正確な制御を可能にするための眼球運動のキャリブレーションと視線の生成を目的とする。

アンドロイドの空気圧アクチュエータの制御性は電動モータよりも高くはない。また、空気圧アクチュエータに対しての、視線の生成に主となるアンドロイドの眼球部の装飾が施された瞳の眼球機構の正確な位置は不明確である。さらに、一般的なアンドロイドはカメラのような外界状況を計測できるセンサが内蔵されておらず、アンドロイドの視点から外界状況を計測し、アンドロイドの眼球制御にフィードバックすることが不可能であった。これらのことがアンドロイドの眼球を制御するにあたって課題であった。

キャリブレーションを行うことで、不明確であった眼球（特に瞳）と空気圧アクチュエータの関係を明らかにし、正確な眼球の制御に利用することが可能となる。キャリブレーションするためには、状態計測が直接できないアンドロイドの眼球姿勢を間接的に計測する必要がある。間接的に計測するために、アンドロイド頭部の運動学と外部センサによる外界状況の計測を組み合わせる。外界状況の中で計測すべき対象は、任意の視線方向の対象である。計測されたアンドロイドの眼球姿勢と眼球部の空気圧アクチュエータの指令値の対応関係をキャリブレーションすることで、正確な視線の生成を実現する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。2章では、提案手法の概要として、研究のアプローチと検証に用いるアンドロイドのシステムについて述べる。3章では、本論文の提案手法であるアンドロイドの眼球姿勢の間接計測方法について述べる。4章では、本論文の提案手法であるキャリブレーション方法について述べる。5章では、3章と4章で提案した手法を被験者実験によって、人間の実際の視線制御と比較することで精度及び妥当性の評価を行う。最後に、6章で本論文での成果についてのまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章 提案手法の概要

2.1 対象とするアンドロイドシステム

本論文で使用するアンドロイドは、株式会社ココロ社製のアクトロイド SIT である。アクトロイド SIT の外観を Fig. 2.1 に示す。アクトロイド SIT は全身に 42 箇所の自由度があり、空気圧アクチュエータで構成されている。42 自由度を活用することでアンドロイドは従来のロボットより人間に近い動作が可能である。さらに空気圧アクチュエータで駆動するため、人間や物に接触しても危害を加えることが少ないようになっている。

Fig. 2.2 にアクトロイド SIT のシステム構成を示す。アクトロイド SIT を動かすにはエアコンプレッサーが必要である。エアコンプレッサーはサーボコントローラを介してアクトロイド SIT の各アクチュエータに空気を送る。そして、サーボコントローラが計算機からの指令でアクトロイド SIT の各部位のアクチュエータに送る空気の量を制御する。サーボコントローラと計算機はシリアル通信で接続されており、各アクチュエータは 8 ビットの指令値で制御される。指令値は 0 から 255 の値で制御可能で、0 の場合は変位が最小となり、255 の場合は変位が最大となる。

アクトロイド SIT の眼球部では、ヨー軸とピッチ軸の 2 自由度を有している。頭部では 4 自由度を有するが、そのうちの 2 自由度はロール軸上に左右に線対称に有している。



Fig. 2.1 Actroid-SIT

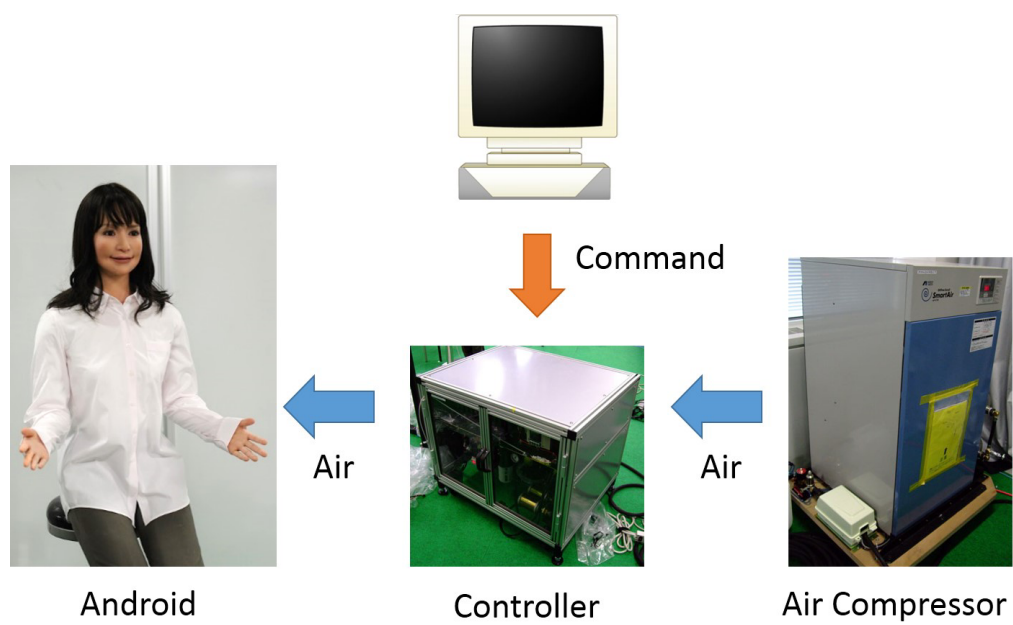


Fig. 2.2 Hardware configuration of the android

2.2 提案手法のアプローチ

本論文で提案するキャリブレーション手法の概要図を Fig. 2.3 に示す．キャリブレーション手法は大きく 2 段階からなっている．

1. アンドロイド頭部の運動学と外界状況の計測を組み合わせ、アンドロイドの眼球姿勢を間接的に計測する（3 章）．
2. 計測されたアンドロイドの眼球姿勢と空気圧アクチュエータの指令値のキャリブレーションを行う（4 章）．

キャリブレーションするためにアンドロイドの眼球姿勢を計測する必要がある．しかし、一般的なアンドロイドでは外界計測可能なセンサを内蔵しておらず、眼球の制御にフィードバックすることができない．そこで、間接的に眼球姿勢を計測する．間接的に計測するために、アンドロイドの眼球姿勢をアンドロイド頭部の運動学による頭部姿勢と外界状況の計測によって得られるアンドロイドの視線方向の対象の姿勢で表現する．

アンドロイド頭部の運動学は、本論文で提案するアクトロイド SIT の頭部姿勢をアクチュエータの指令値から算出できる運動学モデルを用いる．外界状況の計測では、任意の視線方向の姿勢を外部に設置したセンサによって計測する．外部に設置したセンサはモーションキャプチャシステムを用いる．そして、アンドロイド頭部の運動学による頭部姿勢と外界状況の計測によって得られた視線方向対象の姿勢を提案するアンドロイドの眼球姿勢表現方法に入力することで、アンドロイドの眼球姿勢を算出する．この段階をアンドロイドの眼球姿勢の間接計測とする．

次にキャリブレーションをするために、空気圧アクチュエータの制御器を入力をアンドロイドの眼球姿勢、出力を空気圧アクチュエータの指令値として、モデル化する．そして、計測されたアンドロイドの眼球姿勢とその時の空気圧アクチュエータの指令値の対応データを作成する．最後に作成した対応データから回帰分析によって、空気圧アクチュエータの制御器のモデルのパラメータ推定を行う．この段階をキャリブレーションとする．

キャリブレーションによって得られたパラメータを基にアンドロイドの眼球部の空気圧アクチュエータを制御することで、正確な視線の生成を実現する．

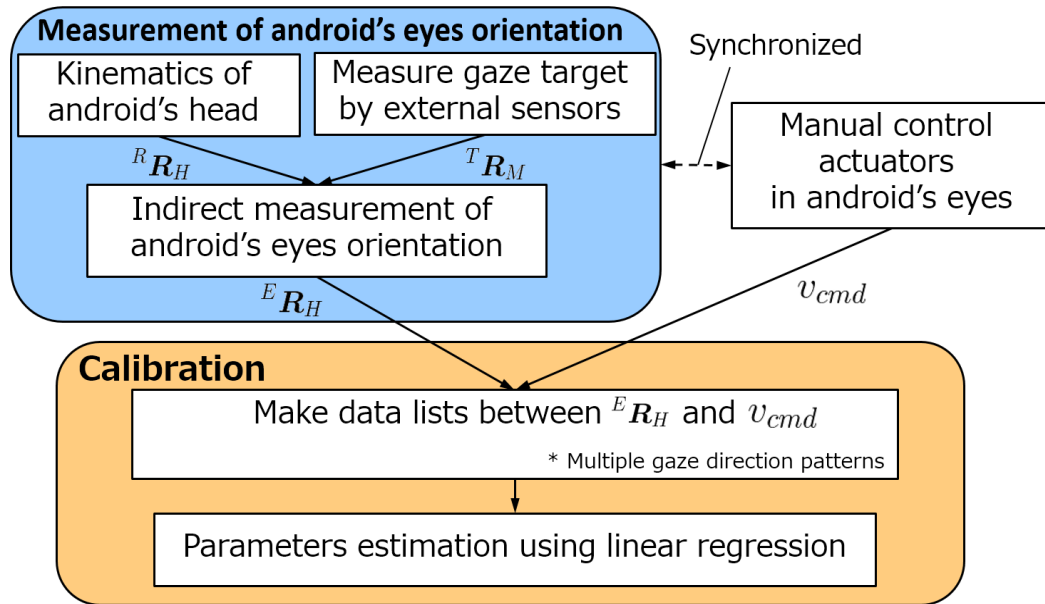


Fig. 2.3 Overview of the proposed gaze calibration method

第 3 章 アンドロイドの眼球姿勢の計測方法

本章では，アンドロイドの眼球姿勢の計測方法について述べる．眼球姿勢を間接計測するために，アンドロイド頭部の運動学と外界状況の計測，そしてこれらを組み合わせたアンドロイドの眼球姿勢の表現を提案する．各節では，アンドロイド頭部の運動学，外界状況の計測，そしてアンドロイドの眼球姿勢表現について述べる．

3.1 アンドロイド頭部の運動学

3.1.1 提案する運動学モデル

アクトロイド SIT の頭部は 4 自由度を有するが，そのうち 2 自由度はロール軸上に左右に線対称に有している．よって，残りの軸も含めて 3 自由度とみなして扱うことができる．したがって，次の式 (3.1.1), (3.1.2), (3.1.3) を用いて，アンドロイドの頭部姿勢の算出が可能である．

$$\theta_{\alpha} = \begin{cases} (v_{cmd_1} - \delta_1) \theta_{lim,\alpha_1} / \delta_1 & (0 < v_{cmd} < \delta_1) \\ \theta_{lim,\alpha_1} & (otherwise) \\ (\delta_2 - v_{cmd_2}) \theta_{lim,\alpha_2} / \delta_2 & (0 < v_{cmd} < \delta_2) \\ \theta_{lim,\alpha_2} & (otherwise) \end{cases} \quad (3.1.1)$$

$$\theta_{\beta} = \begin{cases} (v_{cmd} - v_{neutral}) \theta_{lim,\beta} / \delta & (0 < v_{cmd} < \delta) \\ \theta_{lim,\beta} & (otherwise) \end{cases} \quad (3.1.2)$$

$$\theta_{\gamma} = \begin{cases} (v_{cmd} - v_{neutral}) \theta_{lim,\gamma} / \delta & (0 < v_{cmd} < \delta) \\ \theta_{lim,\gamma} & (otherwise) \end{cases} \quad (3.1.3)$$

θ_{α} , θ_{β} , θ_{γ} はアンドロイド頭部のロール・ピッチ・ヨー軸における角度である． v_{cmd} はアクトロイド SIT の頭部の各アクチュエータの指令値， $v_{neutral}$ はニュートラル状態におけるアクチュエータの値である． $\theta_{lim,\alpha}$, $\theta_{lim,\beta}$, $\theta_{lim,\gamma}$ はアクチュエータの最大可動角度である． δ はアクチュエータの値の分解能である．

3.1.2 頭部動作生成実験

提案するアンドロイド頭部の運動学モデルを確認するため，提案する運動学モデルの式 (3.1.1), (3.1.2), (3.1.3) に基づいて，アンドロイド頭部の動作生成を行った．ロール・ピッチ・ヨー軸の正転・逆転の両方向の動作の生成を行った．さらに，複数の軸による動作生成も確認するため，斜め方向を向いた計 4 方向の動作の生成を行った．

動作生成は実際の人間の頭部動作の姿勢を入力することで行った．Microsoft 社製の Kinect for Windows v2 (Fig. 3.1) から得られる RGB-D 画像に対し，Kinect for Windows SDK v2.0 [17] 内の Face Tracking 機能によって，人間の頭部のロール・ピッチ・ヨー軸の角度を取得した．なお取得した角度値は，ばらつきを抑えるため FIFO 式の移動平均法による前処理を行った．

動作生成結果を Fig. 3.2 に示す．入力した人間の頭部動作と生成されたアンドロイドの頭部動作を対に示してある．Fig. 3.2 より，概ね人間の頭部動作と同様の動

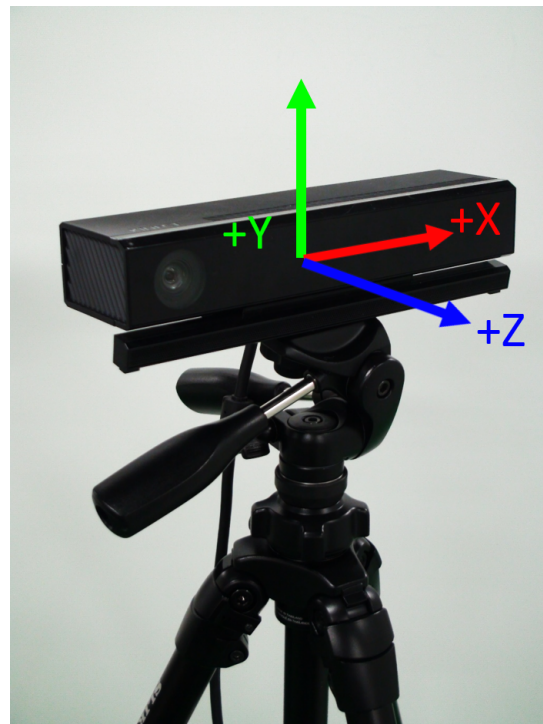


Fig. 3.1 Kinect for Windows v2

作が生成できていることが確認できた。ただし、Fig. 3.2 (d) のように顔のほとんどが隠れているようなうつむきの頭部動作は、人間と同様な動作ができるとは言い難い。原因としては、Kinect for Windows SDK v2.0 内の Face Tracking 機能で人間の顔情報の正確な取得が困難な状況、かつアンドロイドの可動範囲の限界が考えられる。

3.2 外界状況の計測

計測する外界状況の中の視線方向対象は人間の視点を想定しているが、視線方向対象を正確に計測するには対象を固定した姿勢にするべきである。人間の視点を直接計測しようとする、人間側の頭部と眼球の運動を考慮する必要が起きてしまう。したがって本論文では、人間の視点の代替となり姿勢を固定させることが可能な視線方向対象として、カメラとレーザーポインタ装置を提案する。これにより、人間の頭部と眼球の運動の影響を無視することができる。

カメラは Fig. 3.3 に示す市販のビデオカメラを用いた。レーザーポインタ装置は市販のレーザーポインタ [18] を 2 つ用いて、アンドロイドの両眼の間隔と同間隔で平行に配置した装置を製作した。実際に製作した装置を Fig. 3.4 に示す。これらの視線方向対象の姿勢を外部に設置したセンサによって計測する。



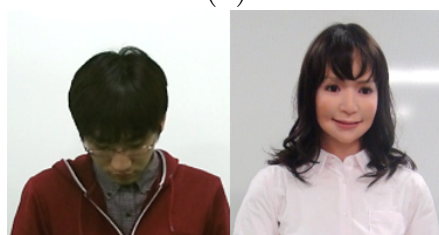
(a)



(b)



(c)



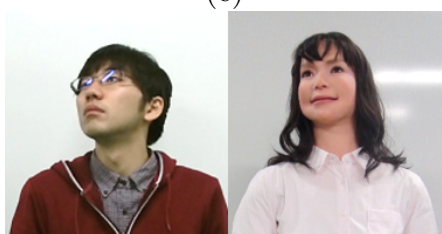
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. 3.2 Experimental results of head motion generation



Fig. 3.3 A camera as a gaze direction object with reflective markers

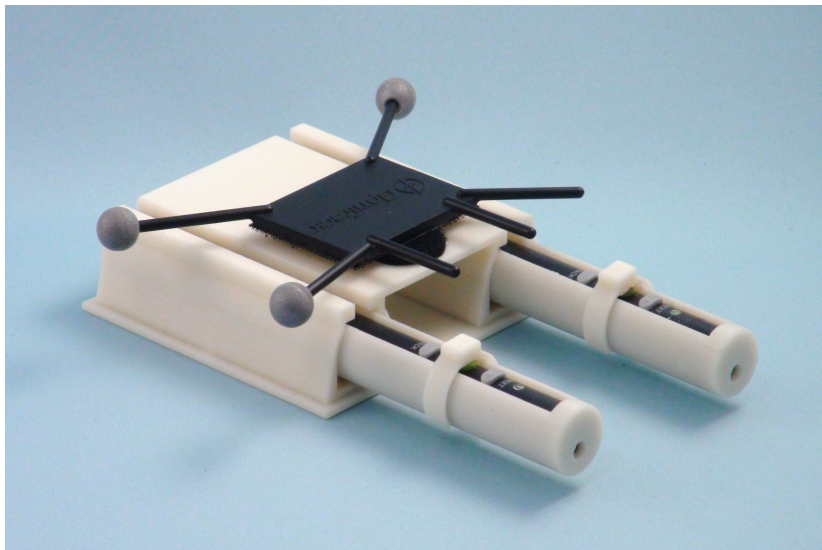


Fig. 3.4 A laser pointer device using two laser pointers as a gaze direction object with reflective markers

3.3 アンドロイドの眼球姿勢の表現方法

本論文で扱う視線方向は一定で位置情報は不要であるため、アンドロイドの眼球姿勢は回転行列で表現することが可能である。Fig. 3.5 に提案手法での座標系の関係を示す。 Σ_R はアンドロイドのロボット座標系を、 Σ_E はアンドロイドの眼球部の座標系を、 Σ_H はアンドロイドの頭部の座標系を表し、 Σ_T は視線方向対象の座標系を、そして、 Σ_M は外界状況計測センサとしてのモーションキャプチャシステムの座標系を表す。そして、アンドロイドの眼球姿勢は、眼球部の座標系から頭部の座標系への回転行列 ${}^E\mathbf{R}_H$ で表現することができ、次の式 (3.3.1) によって算出できる。

$${}^E\mathbf{R}_H = {}^E\mathbf{R}_T {}^T\mathbf{R}_M {}^M\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{R}_H \quad (3.3.1)$$

${}^R\mathbf{R}_H$ はロボット座標系から頭部の座標系への回転行列で、アンドロイドの頭部姿勢を式 (3.1.1), (3.1.2), (3.1.3) によって算出した角度を回転行列に入力したものである。 ${}^M\mathbf{R}_R$ はモーションキャプチャシステム座標系からロボット座標系への回転行列で、視線方向対象の計測環境を構築する際に既知となる。 ${}^T\mathbf{R}_M$ は視線方向対象の座標系からモーションキャプチャシステム座標系への回転行列で、視線方向対象の姿勢を 3.2 節で述べた方法によって計測されたものである。 ${}^E\mathbf{R}_T$ は眼球部の座標系から視線方向対象への回転行列である。眼球部の姿勢と視線方向対象の姿勢は同じにすることができるため、この回転行列は次の式 (3.3.2) で示すことができる。

$${}^E\mathbf{R}_T = \mathbf{E} \quad (3.3.2)$$

$\mathbf{E}$ は単位行列である。よって、式 (3.3.1) は、次の式 (3.3.3) で表現することができる。

$${}^E\mathbf{R}_H(\theta_\beta, \theta_\gamma) = \mathbf{E} {}^C\mathbf{R}_H. \quad (3.3.3)$$

アンドロイドの眼球姿勢を示す回転行列は、眼球部がピッチ軸とヨー軸のみの 2 自由度を有しているため、 ${}^E\mathbf{R}_H(\theta_\beta, \theta_\gamma)$ のように表現できる。したがって、式 (3.3.3) から眼球のピッチ軸とヨー軸の角度を求めることができる。

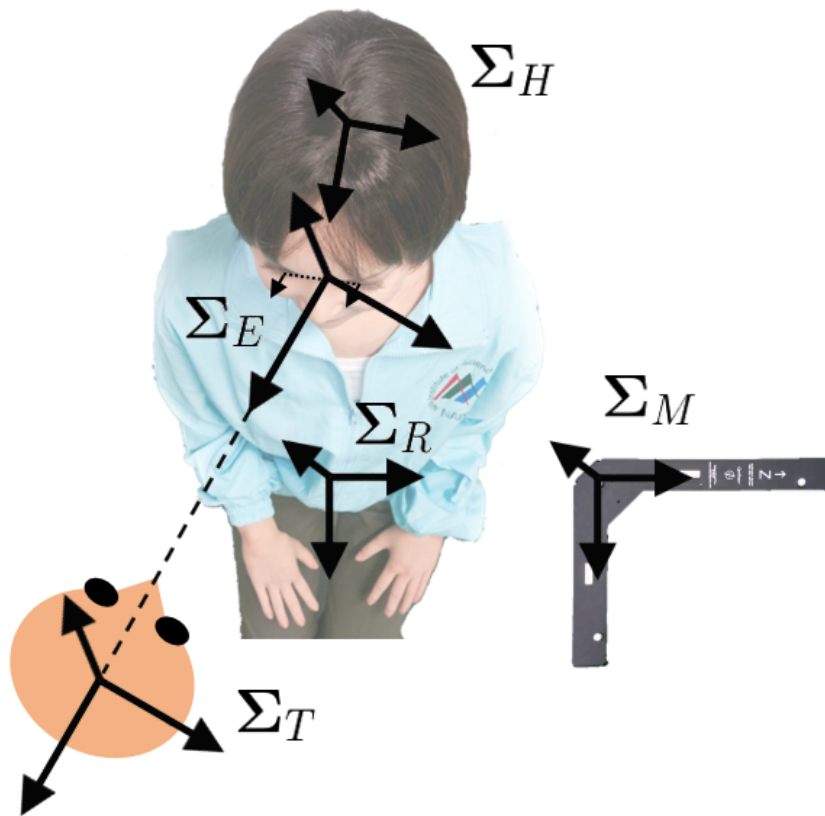


Fig. 3.5 The relations between each coordinate system

第 4 章 眼球姿勢とアクチュエータ指令値のキャリブレーション

本章では，前章で提案したアンドロイドの眼球姿勢の間接計測方法を用いて，実際に計測を行った．そして，空気圧アクチュエータの制御器をモデル化し，計測された眼球姿勢のデータとその時のアクチュエータの指令値のデータから，回帰分析を用いてモデルのパラメータを推定して，キャリブレーションを行う方法を提案する．各節では，計測環境，空気圧アクチュエータの制御器のモデル化，計測された眼球姿勢とその時のアクチュエータの指令値の対応データの作成，そして回帰分析を用いたモデルのパラメータ推定について述べる．

4.1 計測環境

前章で述べたアンドロイドの眼球姿勢の間接計測方法を用いるための光学式モーションキャプチャシステムとして，Optitrack [19] を用いる．この光学式モーションキャプチャによって，視線方向対象の姿勢を直接計測し，運動学によるアンドロイドの頭部姿勢と合わせて，前章で提案したアンドロイドの眼球姿勢の表現方法の式 (3.3.3) に代入することにより，アンドロイドの眼球姿勢を算出する．これらを用いた計測環境を，視線方向対象にカメラを用いた場合と製作したレーザーポイント装置を用いた場合でそれぞれ Fig. 4.1, 4.2 に示す．

計測する際の視線方向の決定条件は，視線方向対象にカメラを用いた場合では，Fig. 4.3 に示すようなアンドロイドの眼球がカメラ方向に向けられているとカメラで撮影された映像を人間が直接見て判断した時とした．また，視線方向対象にレーザーポイント装置を用いた場合では，Fig. 4.4 に示すようなアンドロイドの両目の瞳孔部分に 2 つのレーザーポイント光が当たる時とした．

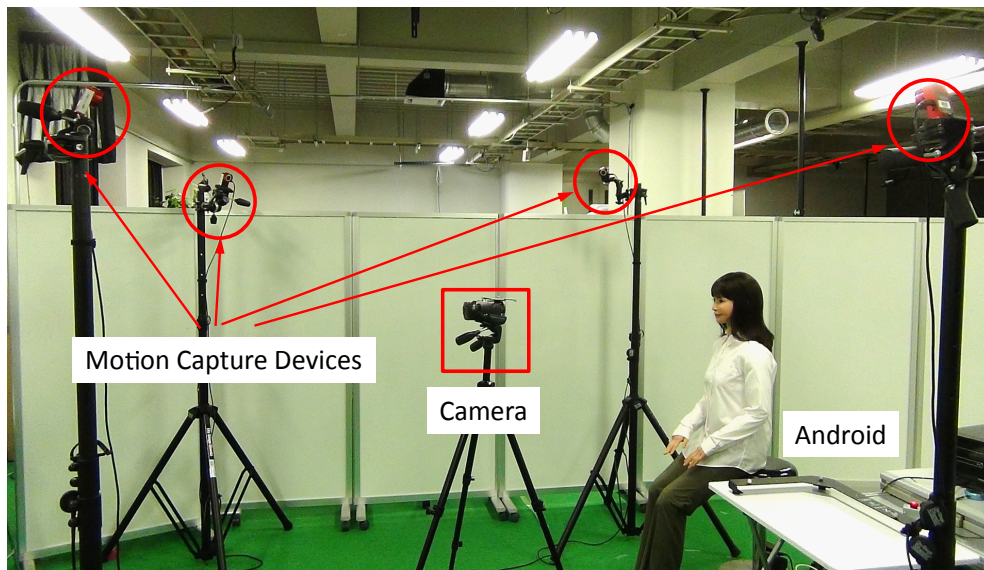


Fig. 4.1 Measurement environment using a camera

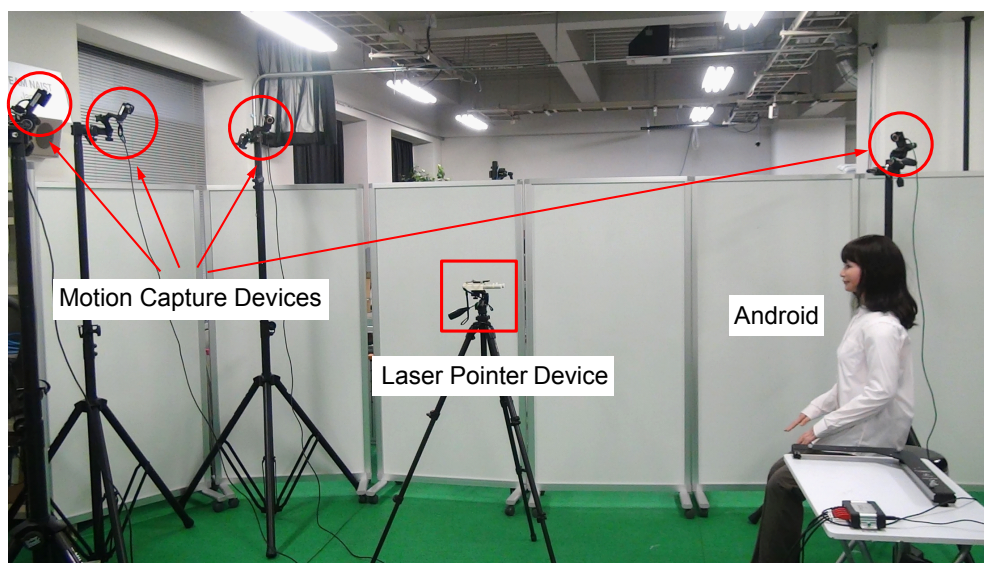


Fig. 4.2 Measurement environment using a laser pointer device

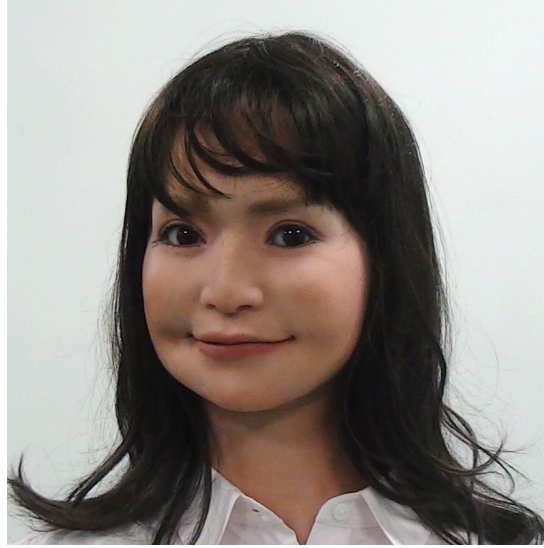


Fig. 4.3 The android is looking directly into the camera

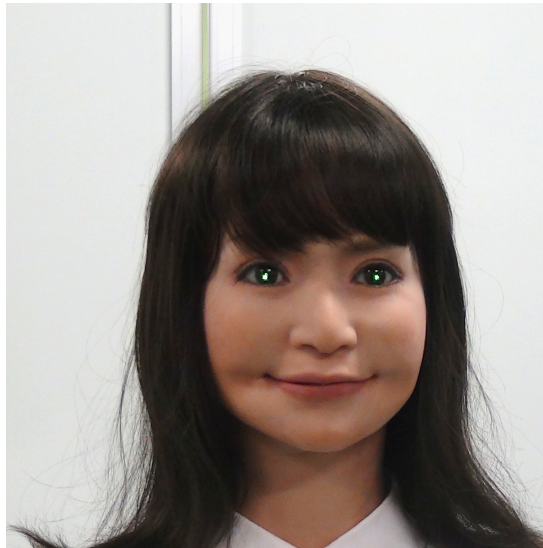


Fig. 4.4 The android's pupils are irradiated with the laser pointer device

4.2 空気圧アクチュエータの制御器のモデル化

キャリブレーションをするために、眼球部の空気圧アクチュエータの制御器を次の式 (4.2.1), (4.2.2) でモデル化する.

$$v_\gamma = a_1\theta_\gamma + b_1, \quad (4.2.1)$$

$$v_\beta = a_2\theta_\beta + b_2, \quad (4.2.2)$$

θ_γ と θ_β は、それぞれアンドロイドの眼球部のヨー軸とピッチ軸の角度である. v_γ と v_β は、それぞれアンドロイドの眼球部のヨー軸とピッチ軸でのアクチュエータの指令値である. このモデル式のパラメータ a_1, b_1, a_2, b_2 を推定するために、回帰分析を用いる. そのために、眼球部の各軸の角度 θ と対応するアクチュエータの指令値 v の対応データを作成する必要がある.

4.3 対応データの作成

対応データは、前章で提案した間接的に計測したアンドロイドの眼球姿勢とその時のアンドロイドの眼球部のアクチュエータの指令値を、眼球部のヨー軸とピッチ軸ごとに分けて作成する.

実際に約 20 方向の視線方向対象を計測し、得られたデータをグラフにプロットした. 視線方向対象に、カメラを用いた場合を Fig. 4.5, 4.6 に、レーザーポインタ装置を用いた場合を Fig. 4.7, 4.8 にそれぞれ示す. 各グラフの横軸はアクチュエータの指令値で、縦軸は眼球部のヨー軸、もしくはピッチ軸の角度を表している.

これらのデータから相関係数を求めた結果、Table. 4.1 となった. Table. 4.1 より、緒賀らの文献 [20] を基に解析すると、カメラを用いた場合では、ヨー軸・ピッチ軸と共に強い相関が見られた. 同様にレーザーポインタ装置を用いた場合では、ヨー軸には強い相関、ピッチ軸には弱い相関が見られた. さらに、t 検定を行った結果を Table. 4.2 に示す. Table. 4.2 より、カメラを用いた場合では、ヨー軸・ピッチ軸と共にデータの相関性に対して非常に有意であることがわかった. レーザーポインタ装置を用いた場合では、ヨー軸でのデータの相関性に対して非常に有意であった一方、ピッチ軸でのデータの相関性に対しては有意差が見られなかった.

以上より、カメラを用いた場合のヨー軸・ピッチ軸とレーザーポインタ装置を用

いた場合のヨー軸でのデータの相関性が認められた.

Table 4.1 Correlation coefficient results

	Eyes' yaw	Eyes' pitch
One camera	0.97	0.92
Laser pointer device	0.98	0.38

Table 4.2 T-test results of correlation coefficient

		Eyes' yaw	Eyes' pitch
One camera	t-value	15.38	9.27
	p-value	5.23e-11 ***	7.81e-08 ***
Laser pointer device	t-value	22.98	1.945
	p-value	2.2e-16 ***	0.0641

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

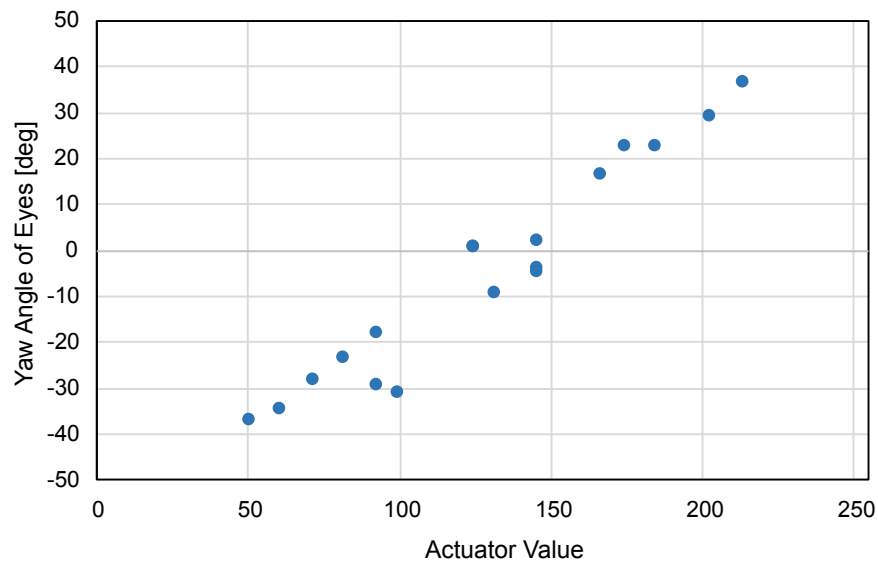


Fig. 4.5 Scatterplot of yaw angles vs actuator value in eyes' yaw using a camera

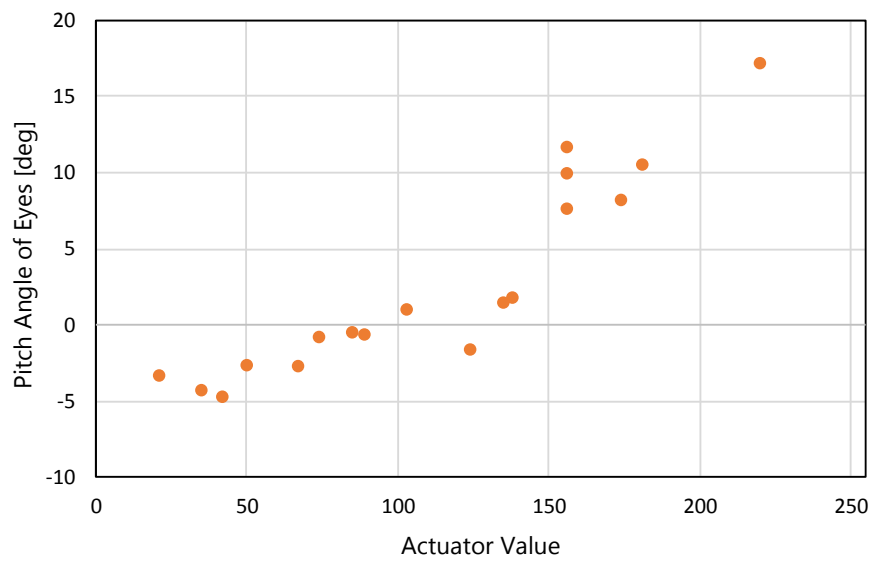


Fig. 4.6 Scatterplot of pitch angles vs actuator value in eyes' pitch using a camera

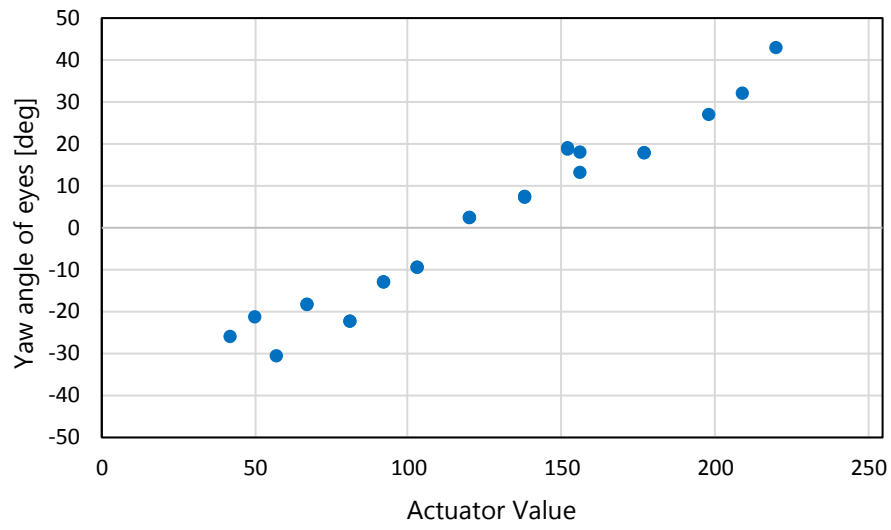


Fig. 4.7 Scatterplot of yaw angles vs actuator value in eyes' yaw using the laser pointer device

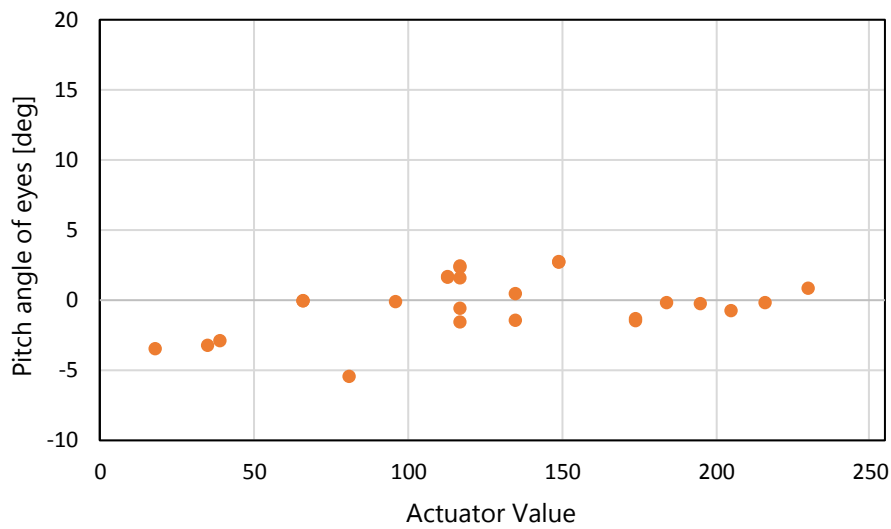


Fig. 4.8 Scatterplot of pitch angles vs actuator value in eyes' pitch using the laser pointer device

4.4 回帰分析によるパラメータ推定

前節で作成した対応データからパラメータの推定を行う。

4.4.1 回帰直線の推定

データからの式 (4.2.1), (4.2.2) のパラメータ推定には単回帰分析 [21] を用いた。単回帰分析によって、パラメータを含んだモデルは各軸ごとで、視線方向対象にカメラを用いた場合では式 (4.4.1), (4.4.2) となった。視線方向対象にレーザーポインタ装置を用いた場合では式 (4.4.3), (4.4.4) と推定された。

$$v_{\gamma, cam} = 2.01 \theta_{\gamma, cam} + 136.9 \quad (4.4.1)$$

$$v_{\beta, cam} = 8.07 \theta_{\beta, cam} + 89.7 \quad (4.4.2)$$

$$v_{\gamma, laser} = 2.45 \theta_{\gamma, laser} + 120.4 \quad (4.4.3)$$

$$v_{\beta, laser} = 10.30 \theta_{\beta, laser} + 128.9 \quad (4.4.4)$$

v_{γ} , v_{β} は、それぞれアンドロイドの眼球部のヨー軸とピッチ軸でのアクチュエータの指令値である。 θ_{γ} , θ_{β} は、それぞれアンドロイドの眼球のヨー軸とピッチ軸の角度である。

推定された回帰直線を、Fig. 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 に対応データのプロットも含んだグラフとして示した。各グラフの横軸は眼球部のヨー軸、もしくはピッチ軸の角度で、縦軸はアクチュエータの指令値を表している。

4.4.2 回帰分析の評価

推定された回帰直線の信頼性を調べるため、間瀬らの文献 [22] を基に、t 検定を行い、さらに決定係数（寄与率）を算出した。結果を Table. 4.3, 4.4 に示す。

Table. 4.3 より、t 検定の結果、カメラを用いた場合では、ヨー軸・ピッチ軸と共に回帰直線の傾きと切片が非常に有意であることがわかった。レーザーポインタ装置を用いた場合では、ヨー軸での回帰直線の傾きと切片とピッチ軸での回帰直線の切片が非常に有意であった一方、ピッチ軸での回帰直線の傾きには有意差が見られなかった。

Table 4.3 T-test results of simple linear regression

		Eyes' yaw		Eyes' pitch	
		slope	intercept	slope	intercept
One camera	t-value	15.38	45.29	9.27	15.04
	p-value	5.23e-11 ***	2e-16 ***	7.81e-08 ***	7.32e-11 ***
Laser pointer device	t-value	22.98	56.81	1.945	11.893
	p-value	2e-16 ***	2e-16 ***	0.0641	2.64e-11 ***

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

Table 4.4 Coefficient of determination results

	Eyes' yaw	Eyes' pitch
One camera	0.94	0.84
Laser pointer device	0.96	0.14

さらに、Table. 4.4 より、カメラを用いた場合では、ヨー軸・ピッチ軸と共に回帰式のあてはめが良いことがわかる。レーザーポインタ装置を用いた場合では、ヨー軸では回帰式のあてはめが良い一方、ピッチ軸ではあてはめが悪いことがわかる。

以上より、カメラを用いた場合でのヨー軸・ピッチ軸における回帰直線とレーザーポインタ装置を用いた場合でのヨー軸における回帰直線が信頼性高いことがわかる。

レーザーポインタ装置を用いた場合でのピッチ軸において信頼性が低くなってしまったのは、前節で述べたのと同様に、レーザーポインタ装置の姿勢がピッチ軸に対して拘束することができず、アンドロイドの眼球姿勢を正確に算出できなかったことが原因だと考えられる。

したがって、キャリブレーション結果として用いることが可能なのは、カメラを用いた場合のヨー軸・ピッチ軸の式 (4.4.1),(4.4.2) とレーザーポインタ装置を用いた場合のヨー軸の式 (4.4.3) のパラメータである。

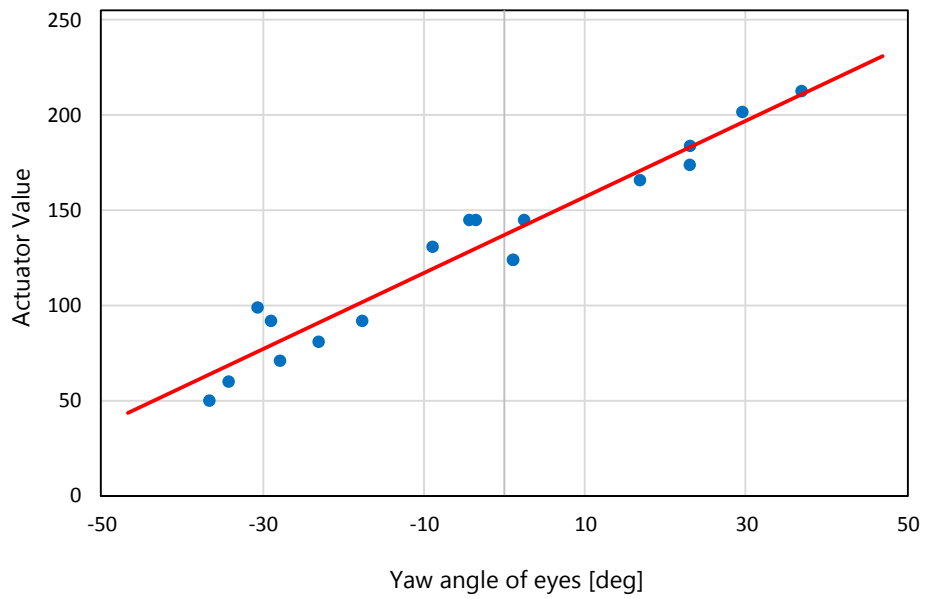


Fig. 4.9 Calibration results of eyes' yaw using a camera

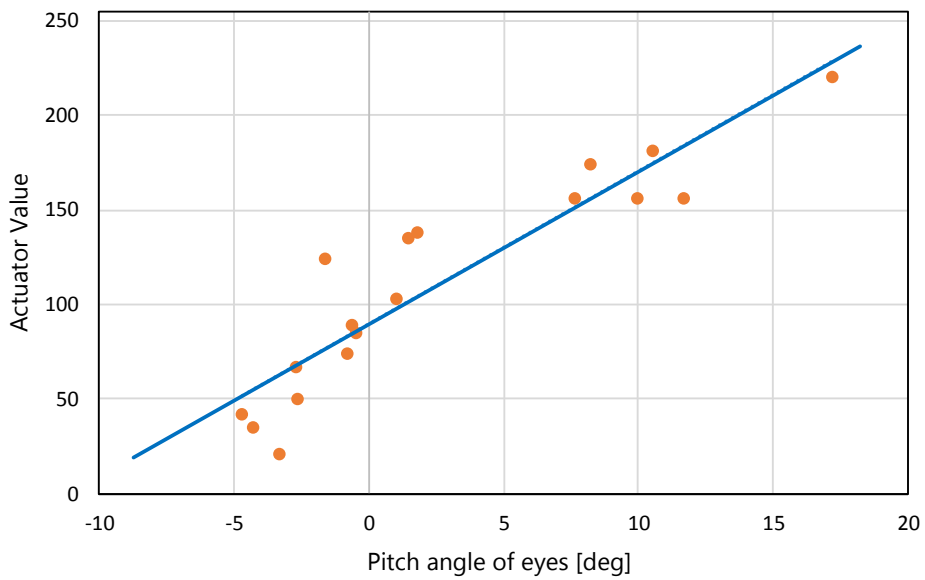


Fig. 4.10 Calibration results of eyes' pitch using a camera

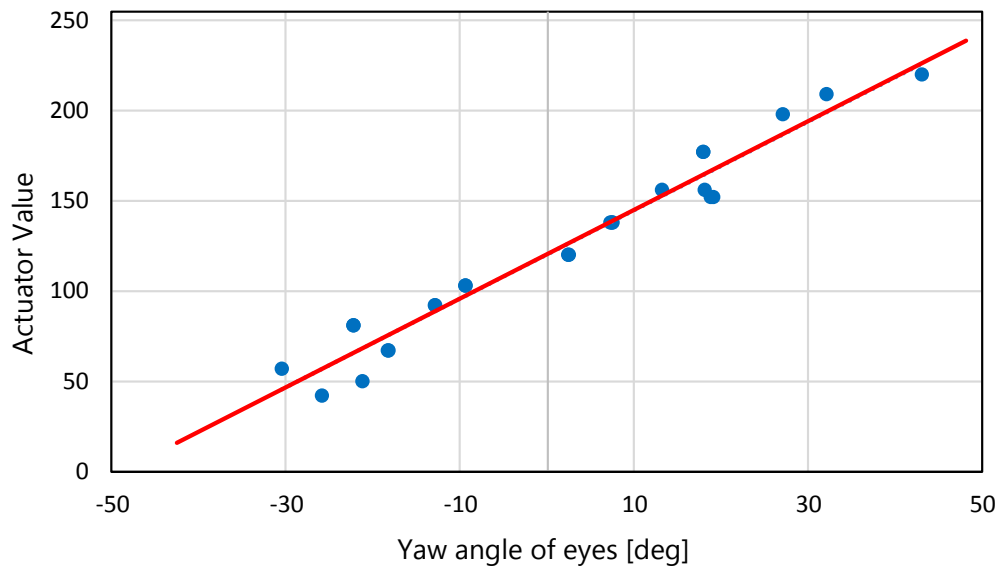


Fig. 4.11 Calibration results of eyes' yaw using a laser pointer device

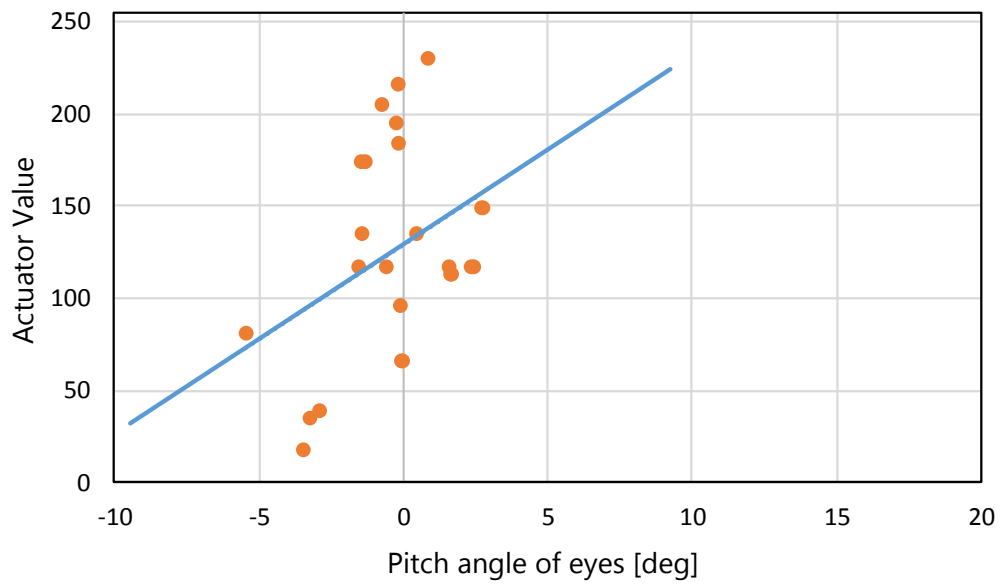


Fig. 4.12 Calibration results of eyes' pitch using a laser pointer device

4.5 視線生成実験

前節で得られたキャリブレーション結果のパラメータを用いて、いくつかの視線方向対象に向けて視線を生成することができるのか確認した。この実験では、ヨー軸・ピッチ軸カメラを用いた場合のヨー軸・ピッチ軸の式 (4.4.1),(4.4.2) のパラメータから視線を生成した。生成した視線の様子をより明示できるようにするため、固定した 1 台のカメラ（固定視点）と視線方向対象のカメラから撮影した (Fig. 4.13, 4.14)。

Fig. 4.13, 4.14 より、固定視点からでは同じような視線の画像がないことや視線方向対象での視点からでは視線方向対象に向けて視線を生成していることから、各方向に向けられていることが確認できた。

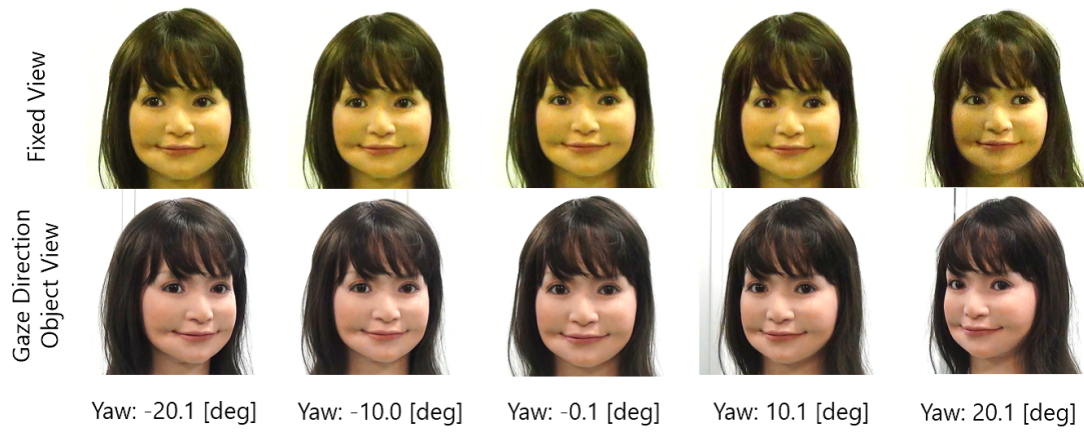


Fig. 4.13 Results of gaze generation in eyes' pitch using a camera

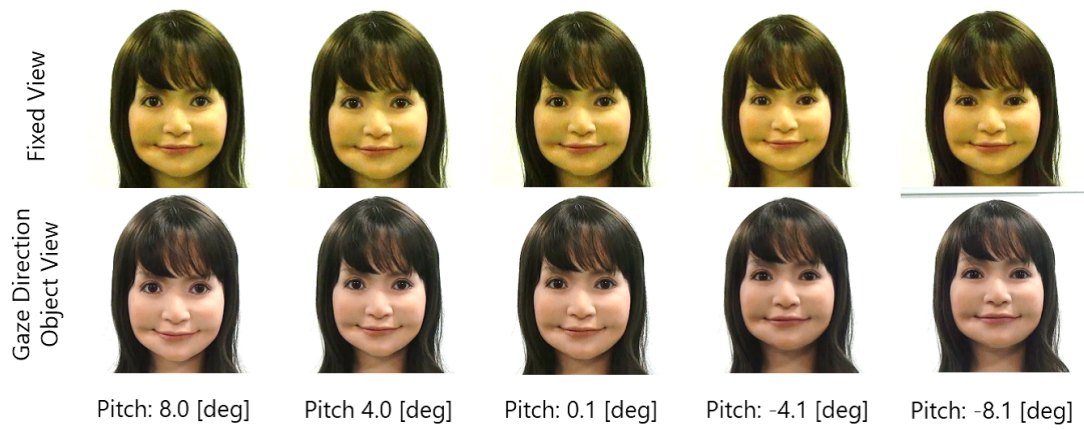


Fig. 4.14 Results of gaze generation in eyes' pitch using a camera

第 5 章 キャリブレーション結果の精度評価実験

本章では，提案手法で得られたキャリブレーション結果を用いて生成した視線の精度と妥当性の評価実験について述べる．

5.1 実験目的

本実験は，提案手法によって得られたキャリブレーション結果を用いて生成したアンドロイドの視線の精度と妥当性を被験者実験によって評価することを目的とする．そこで人間の視線知覚は，キャリブレーション結果に基づくアンドロイドの視線制御に対する時が人間の視線制御に対する場合に近づくという仮説を立てる．人間の視線制御に対する視線知覚とアンドロイドの視線制御に対する視線知覚を比較し，仮説を検証することで精度と妥当性を評価する．

5.2 実験の流れ

実験の様子を Fig. 5.1 に示す．被験者は Fig. 5.1 中にあるディスプレイの対面に着席する．そして被験者は，ディスプレイ上に表示されるアンドロイドや人間の顔画像を見て，その時の顔画像が持つ視線が被験者が座っている方向を見ているか否かの二択問題を受けてもらうよう説明を受ける．

問題では，アンドロイドもしくは人間の顔の画像が 1 枚提示された時を 1 問とし，1 問ごとに回答用紙の「Yes」か「No」の欄に回答してもらう．問題数は，アンドロイドの顔画像を 25 パターン用意した問題 25 問をキャリブレーションにカメラを用いた場合とレーザーポインタ装置を用いた場合の計 50 問と人間の顔画像を 25 パターン用意した問題 25 問の合計 75 問を用意する．

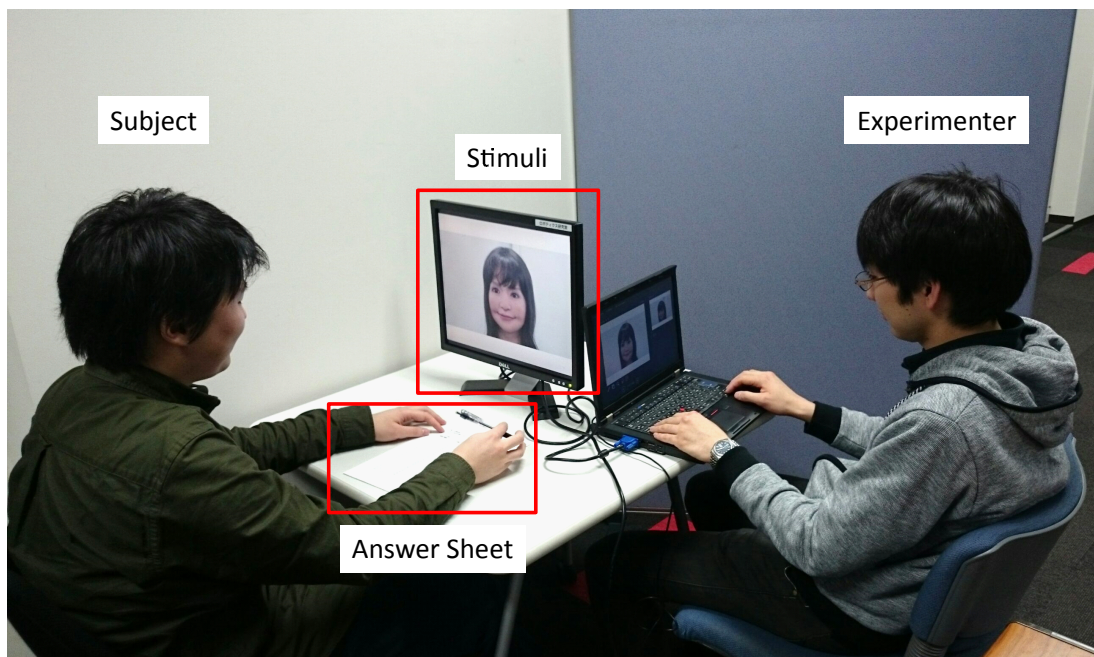


Fig. 5.1 Experiment environment

5.3 実験条件

被験者は視力が正常な 20 代の 20 人である。実験の順番は、順番による結果への影響を避けるため、半分の 10 人を、キャリブレーションにカメラを用いた場合のアンドロイド、人間、同様にレーザーポインタ装置を用いた場合のアンドロイドの順で行い、残り半分の 10 人を、同様にレーザーポインタを用いた場合のアンドロイド、人間、同様にカメラを用いた場合のアンドロイドの順で行った。

被験者に提示する顔画像は、Fig. 5.2, 5.3 に示す計測環境で撮影した。Fig. 5.2, 5.3 の計測環境では、アンドロイドもしくは人間の視点を中心に水平な $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ の計 5 方向かつ、視点から 1.5m のところに 5 台の市販のビデオカメラを設置した。そして、アンドロイドや人間の顔を同時に 5 方向に設置した 5 台のビデオカメラで撮影した。

アンドロイドの視線は、前章で推定したパラメータを用いて、ビデオカメラが固定されている方向の $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ を生成した。なお、頭部の姿勢は正面方向の 0° を入力した状態で固定した。

人間の視線は、眼球運動や視力が正常な男性が 5 方向に設置した各ビデオカメラの方向を見ることで生成した。視線の生成は、できる限り頭部の姿勢を正面方向の 0° に安定させるために、必ず正面方向の 0° に頭部と眼球を向けてから、各方向に眼球だけを動かして行った。

以上より、キャリブレーションにカメラを用いた場合もしくはレーザーポインタ装置を用いた場合でのアンドロイドや人間ごとに 25 パターンの顔画像が生成される。実験ではこの画像をランダムに並び替えてディスプレイ上に 1 枚ずつ提示した (Fig. 5.1)。

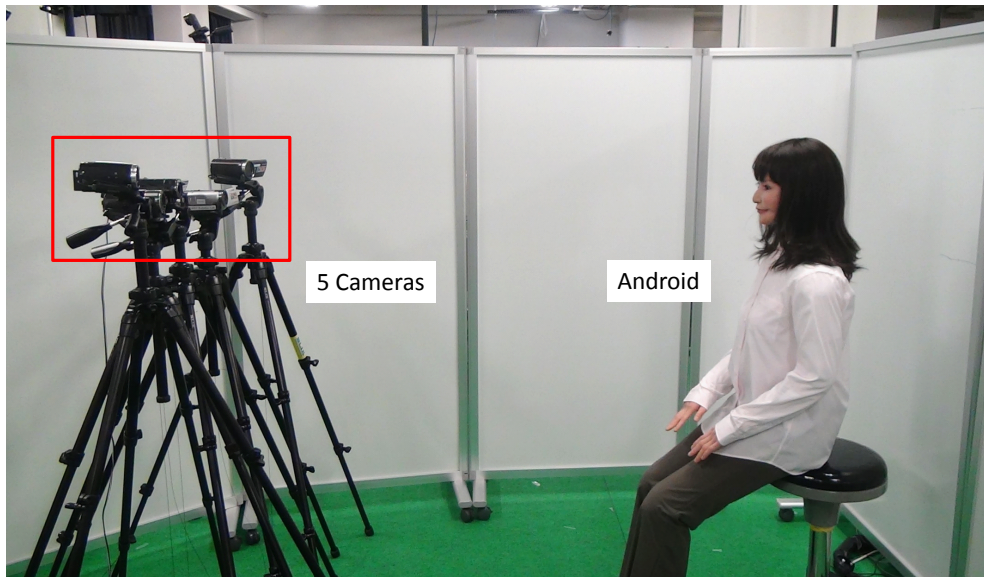


Fig. 5.2 Measurement environment for an android using 5 cameras

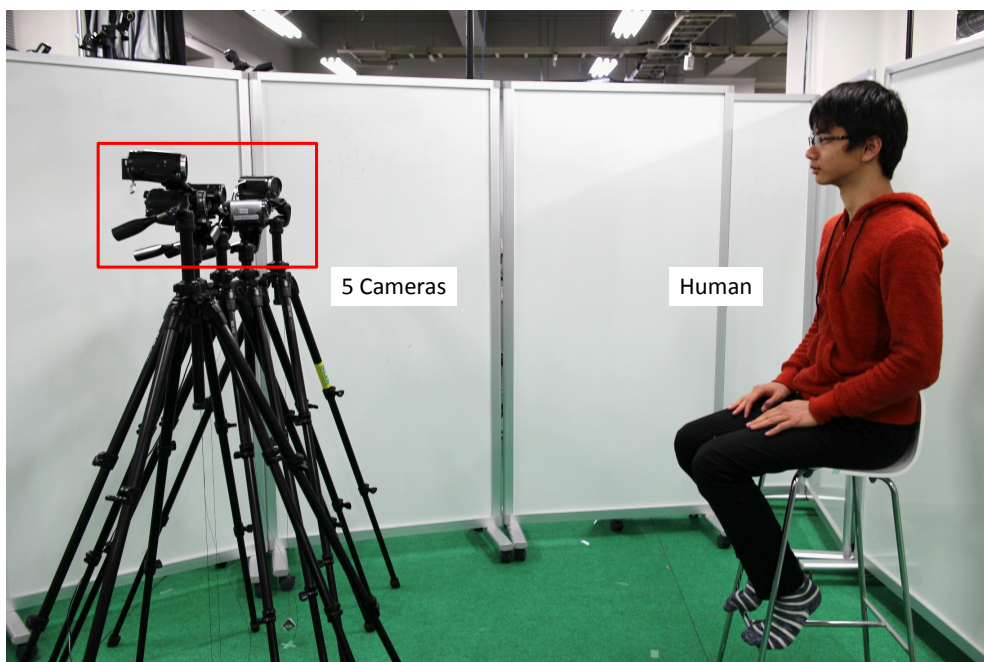


Fig. 5.3 Measurement environment for a human using 5 cameras

5.4 実験結果

実験結果を各方向 ($0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$) ごとの被験者の平均正解率で示す．結果を Table. 5.1 と Fig. 5.4 に示す．Table. 5.1 と Fig. 5.4 より，レーザーポインタを用いた場合のアンドロイドでの結果が， -10° から 10° にかけて，正解率が単調に下がっていることがわかる．これは，キャリブレーションの際に何かしらのバイアスが載ってしまった可能性がある．したがって，実験結果の分析には，レーザーポインタを用いた場合のアンドロイドでの結果を除くことにした．

改めて，カメラを用いた場合のアンドロイドと人間での正解率で比較したものを Fig. 5.5 に示す．Fig. 5.5 より，t 検定した結果， $0^\circ, \pm 5^\circ, 10^\circ$ での方向においては有意差は見られなかったが， -10° の方向では非常に有意な差が見られた．

さらに，正解数，不正解数でカメラを用いた場合のアンドロイドと人間の対応関係を Table. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 に示す．これらの結果は対応のある 2 値型のデータなので，McNemar の検定 [23] を行った．Table. 5.7 に示した検定結果より， $\pm 5^\circ$ と 10° での方向においては有意差は見られなかったが， -10° の方向では非常に有意な差が， 0° の方向では有意差が見られた．

Table 5.1 Accuracy results [%]

		Yaw angle of camera				
		-10°	-5°	0°	5°	10°
Android	One camera	69	83	70	83	89
	Laser pointer device	97	88	74	67	48
Human		92	80	61	76	94

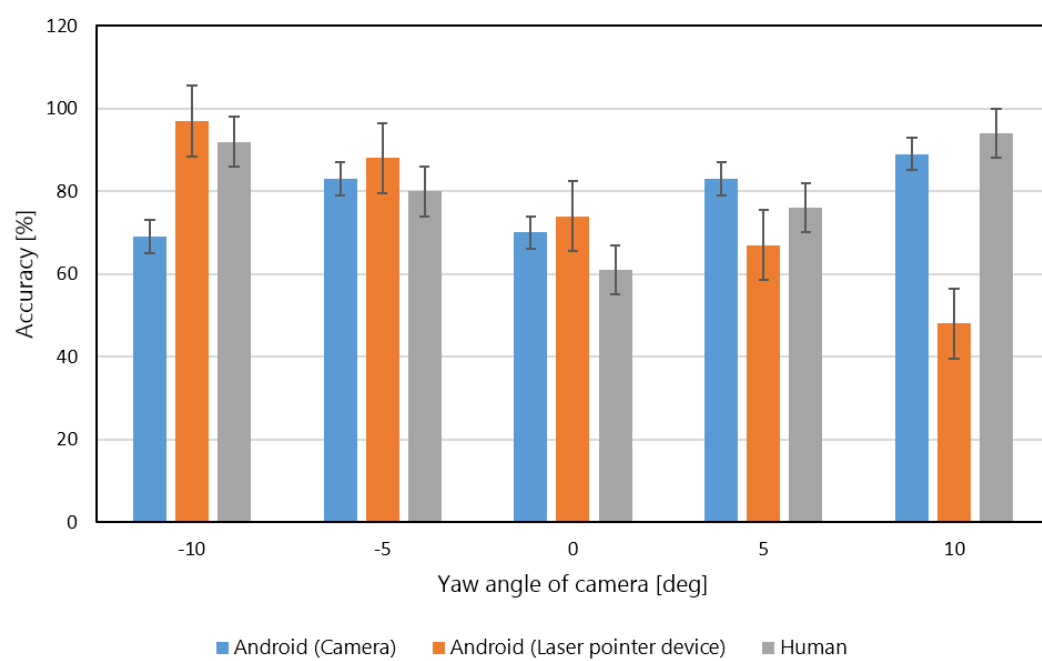


Fig. 5.4 Bar graph of accuracy results

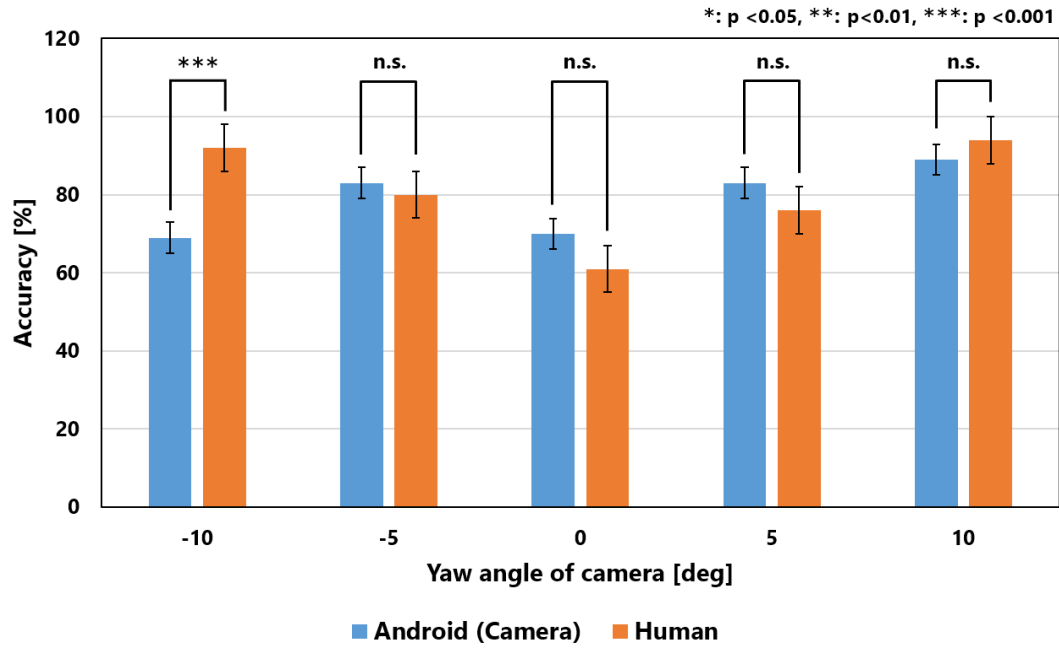


Fig. 5.5 Comparison of android and human between the average of accuracy

Table 5.2 Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of -10°

		Android (Camera)		Total
		True	False	
Human	True	63	29	92
	False	6	2	8
	Total	69	21	100

Table 5.3 Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of -5°

		Android (Camera)		Total
		True	False	
Human	True	73	7	80
	False	10	10	20
	Total	83	18	100

Table 5.4 Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 0°

		Android (Camera)		Total
		True	False	
Human	True	57	4	61
	False	13	26	39
	Total	70	30	100

Table 5.5 Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 5°

		Android (Camera)		Total
		True	False	
Human	True	72	4	76
	False	11	13	24
	Total	83	17	100

Table 5.6 Results of true/false numbers of subject's answers in the direction of 10°

		Android (Camera)		Total
		True	False	
Human	True	86	8	94
	False	3	3	6
	Total	89	11	100

Table 5.7 Comparison of android and human between true/false numbers of subject's answers

Yaw angle of camera [deg]	-10°	-5°	0°	5°	10°
p-value	0.0001.012 ***	0.4669	0.2905 *	0.0707	0.1317

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

5.5 考察

前節で正解率と正解数から、検定を行った結果、 $\pm 5^\circ$ と 10° の場合では有意差が見られなかった。つまり、 $\pm 5^\circ$ と 10° の場合では、アンドロイドでの視線生成と人間の視線生成の間には意味のある差はなかったと言える。また 0° と -10° の場合では、検定を行った結果、有意差が見られた。

そこで、 0° と -10° での有意差の要因を分析した。 0° の場合では、Table. 5.1 や Fig. 5.4 から、他の角度より人間の視線に対する知覚が低いことがわかった。これは、端正に作られたアンドロイドの顔や目と違って、人間の顔や目の領域のバランスといった個性の影響や性別の影響があったのではないかと考えられる。少なくとも、人間の視線のサンプルが成人男性 1 人のものであったため、要因を断言することはできない。 -10° の場合では、アンドロイドの眼球制御が正確にできていなかった可能性があることがわかった。Fig. 5.6, 5.7 に、 -5° と -10° の場合の視線画像を示す。これらの視線画像から、 -10° から -5° の範囲内に制御された可能性があることわかる。

以上より、本章での実験の仮説は十分に検証できたとは言えないが、仮説の部分的な検証まではできたのではないかと考えられる。つまり、正確な視線の生成実現のために、キャリブレーションによる効果はあると考えられる。より仮説を十分に検証するためには、人間のサンプルを女性にすることや一個人の画像だけではなく平均顔を用いることや被験者をより増やすことや提示画像の視線の角度の範囲を増やすことが必要だと考えられる。

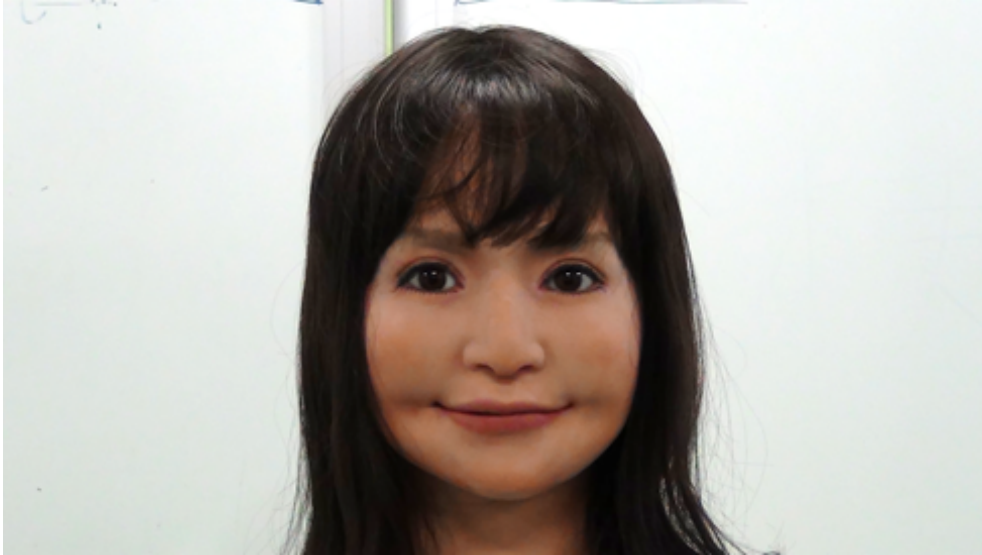


Fig. 5.6 A gaze sample of the android in the case of -5°

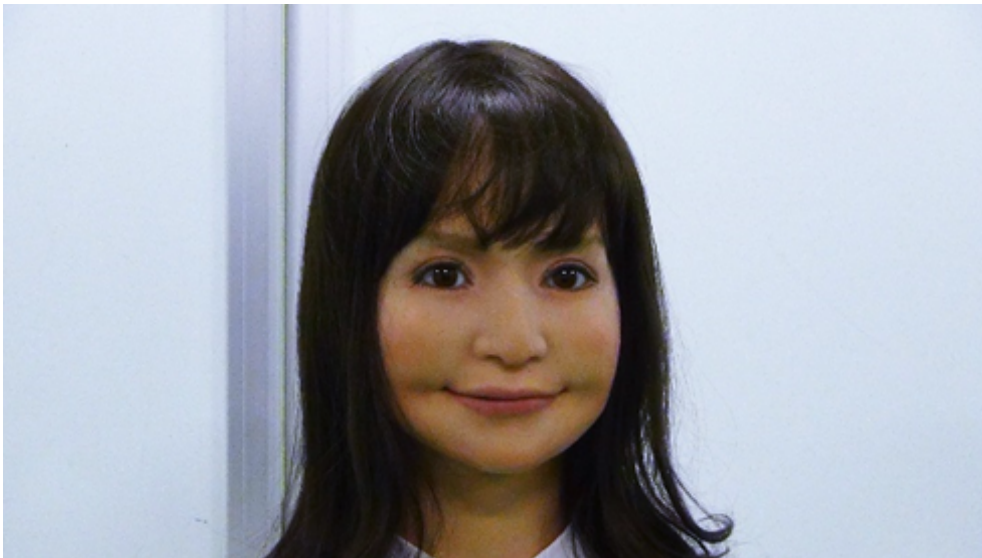


Fig. 5.7 A gaze sample of the android in the case of -10°

第 6 章 おわりに

6.1 本論文のまとめ

本論文では，アンドロイドの眼球運動のキャリブレーションと視線の生成方法を提案した．提案手法では，アンドロイドの眼球姿勢の間接計測を行い，計測された眼球姿勢とアクチュエータの指令値の関係からキャリブレーションを行った．眼球姿勢の間接計測は，アンドロイド頭部の運動学による頭部姿勢の算出と光学式モーションキャプチャによる外界計測可能なセンサでの視線方向対象の姿勢計測を組み合わせた方法を提案した．眼球姿勢とアクチュエータの指令値の関係からのキャリブレーションでは，眼球部の空気圧アクチュエータの制御器をモデル化し，対応関係のデータから回帰分析を行うことで眼球部の空気圧アクチュエータの制御モデルのパラメータを推定した．

提案手法の有効性を確認するのにキャリブレーション結果を用いていくつかの視線方向対象に向けた視線生成実験と精度評価実験を行った．視線生成実験では，各視線方向対象に視線を向けられることを確認した．精度評価実験では，提案手法のキャリブレーション結果を用いて生成したアンドロイドの視線と人間の実際の視線を比較する被験者実験を行った．この被験者実験では，被験者の視線知覚は，提案手法によるアンドロイドの視線に対する場合が人間の視線に対する場合に近づくという仮説を立て，その仮説を検証する実験を行った．実験では，仮説の十分な検証はできなかったが，仮説の部分的な検証を行えた．つまり，正確な視線の生成実現をするためには，提案手法つまりキャリブレーションによる効果があることを確認した．しかし，本論文での提案手法のみだけでは，正確な視線の生成実現を可能にするのは難しいということもわかった．

6.2 今後の課題と展望

今後の課題としては、本論文の評価実験のアプローチだけでは、提案手法の有効性を十分に評価できていないという問題があるため、様々な評価実験を行っていく必要がある。また本論文での評価実験では、アンドロイドの眼球部のピッチ軸については実験環境のカメラのサイズとスペースの制限から行えなかったため、今後でも検討する必要があると考えられる。さらに、同実験ではアンドロイドの顔画像を使ったが、実際のアンドロイドと体面した時の実験も検討する必要があると考えられる。一方で、同実験の人間の顔画像は、アンドロイドと同じの性別の画像や平均顔を用いることを検討する必要があると考えられる。

また本論文での提案手法は、静的な視線生成しか行っていないため、動的な視線生成も同様に適用できるか検討する必要がある。

そして、本論文では扱わなかったアンドロイドの頭部も含めた視線の生成を考慮する必要がある。そのために、頭部と眼球部の分担比 [24] を用いるといった方法が考えられる。

最後に本論文の提案手法を足がかりにして、様々なアンドロイドのインタラクションに拡張できることを期待している。

謝辞

本論文は著者が奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程在学中にロボティクス研究室で行った研究をまとめたものである。

本研究を遂行するにあたり，貴重なご指導とご助言と賜りました本研究科の小笠原司教授に深く感謝致します。

論文執筆にあたり，丁寧なご検討，ご教示を頂いただけではなく，本研究の意義をととても評価していただいた萩田紀博教授に深く御礼申し上げます。

本研究の方針決定，遂行，論文執筆などにおいて多くのご助言，ご指導を頂きました本研究科の高松淳准教授に深く感謝致します。

研究方針や論文執筆などの研究全般にわたり，多くのご助言とご指導を頂きました本研究科の丁明助教に深く感謝致します。

英語添削や研究発表の姿勢などの研究全般にわたり，ご助言とご指導を頂きました本研究科の博士研究員 GARCIA RICARDEZ Gustavo Alfonso 氏に深く感謝致します。

研究会でのご助言やアンドロイド研究の魅力を教えて頂きました大阪工業大学の吉川雅博特任准教授に深く感謝致します。

大学生活や学会発表における事務処理の面で様々なサポートをして頂きました本研究室秘書の大脇美千代氏，池田美輝氏に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，様々な議論やご助言を頂いた本研究室サービスロボットグループの築地原里樹氏，袴田有哉氏に感謝致します。

本研究の実験遂行にあたり，被験者に協力して下さった同期や後輩達に感謝致します。

さらに本研究の遂行にあたり，心理学の文献調査や実験評価手法に用いる統計学に関して助言をくれた，学部生の時からの友人でもある，電気通信大学大学院情報理工学研究科宮脇研究室所属の赤松和昌氏に感謝致します。

そして，研究テーマの模索から本研究の遂行，論文執筆だけでなく，モチベーション維持・向上でもお世話になりました，本研究室所属のエリさんには，多大なご厚情に感謝しております。

最後に，長年の学生生活を支えて頂いた両親，家族，友人達に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 西尾修一, 石黒浩 : “人として人とつながるロボット研究,” 電子情報通信学会誌, Vol. 91, No. 5, pp. 411-416, 2008.
- [2] S. Krach, F. Hegel, B. Wrede, G. Sagerer, F. Binkofski, and T. Kircher: “Can Machines Think? Interaction and Perspective Taking with Robots Investigated via fMRI,” PLOS ONE, Vol. 3, No. 7, e2597, doi: 10.1371/journal.pone.0002597, 2008.
- [3] C. L. Kleinke: “Gaze and Eye Contact: A Research Review,” Psychological Bulletin, Vol. 100, No. 1, pp. 78-100, 1986.
- [4] 武川直樹 : “コミュニケーションにおける視線の役割—視線が伝える意図・気持ち—,” 電子情報通信学会誌, Vol. 85, No. 10, pp. 756-760, 2002.
- [5] M. Argyle, and J. Dean: “Eye-Contact, Distance and Affiliation,” Sociometry, Vol. 28, No. 3, pp. 289-304, 1965.
- [6] A. Kendon: “Some functions of gaze direction in social interaction,” Acta Psychol, Vol. 26, pp. 22-63, 1967.
- [7] R. Vertegaal, R. Slagter, G. Veer, and A. Nijholt: “Eye Gaze Patterns in Conversations: There is More to Conversational Agents Than Meets the Eyes,” Proc. of the Annual ACM SIGCHI Int. Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001), pp. 301-308, 2001.
- [8] M. Shimada, Y. Yoshikawa, M. Asada, N. Saiwaki, and H. Ishiguro: “Effects of Observing Eye Contact between a Robot and Another Person,” International Journal of Social Robotics, Vol. 3, No. 2, pp. 143-154, 2011.

- [9] T. Harada, Y. Nakamura, Y. Matsumoto, and H. Ishiguro: “Vibration Suppression Control Using a Pattern Generator for a Robot Driven by Air Actuators,” Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biometrics (ROBIO 2008), pp. 756-761, 2009.
- [10] Y. Kondo, M. Kawamura, K. Takemura, J. Takamatsu, and T. Ogasawara: “Gaze Motion Planning for Android Robot,” Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction (HRI 2011), pp. 171-172, 2011.
- [11] 山森崇義, 坂本大介, 西尾修一, 石黒浩, 萩田紀博: “アンドロイドとの「目が合う」条件の検証,” HAI シンポジウム 2007 (HAI-2007), 1B-2, 2007.
- [12] 吉川雅博, 住谷昌彦, 松本吉央, 石黒浩: “医療福祉現場を支援するアンドロイドロボットシステム,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 2, pp. 197-207, 2012.
- [13] O. Palinko, A. Sciutti, Y. Wakita, Y. Matsumoto, and G. Sandini: “If Looks Could Kill: Humanoid Robots Play a Gaze-based Social Game with Humans,” Proc. of the 16th Annual IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp. 905-910, 2016.
- [14] S. Nishio, H. Ishiguro, and N. Hagita: Geminoid: Teleoperated android of an existing person., INTECH Open Access Publisher Vienna, 2007.
- [15] D. F. Glas, T. Minato, C. T. Ishi, T. Kawahara, and H. Ishiguro: “ERICA: The ERATO Intelligent Conversational Android,” Proc. of the 25th Annual IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2016), pp. 22-29, 2016.

- [16] J. Even, C. T. Ishi, and H. Ishiguro: “Using sensor network for android gaze control,” Proc. of the 43rd Japanese Society for Artificial Intelligence Meeting of Special Interest Group on AI Challenges, pp. 29-34, 2015.
- [17] “Kinect for Windows SDK 2.0,” <https://dev.windows.com/en-us/kinect/develop>.
- [18] “ELP-G30,” <http://www.kokuyo-st.co.jp/stationery/lp/pdf/elp-g30.pdf>.
- [19] “OptiTrack,” <http://www.optitrack.com>.
- [20] 緒賀郷志 : R による心理・調査データ解析, 東京図書, 2010.
- [21] S. Chatterjee, and A. S. Hadi: Regression Analysis by Example, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [22] 間瀬茂, 神保雅一, 鎌倉稔成, 金藤浩司 : 工学のためのデータサイエンス入門ーフリーな統計環境 R を用いたデータ解析ー. 数理工学社, 2004.
- [23] Q. McNemar: “Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages,” Psychometrika, vol. 12, no. 2, pp. 153-157, 1947.
- [24] S. Masuko, and J. Hoshino: “Generating Head-Eye Movement for Virtual Actor,” Systems and Computers in Japan, Vol. 37, No. 12, pp. 33-44, 2006.