

音声対話における眼球動作モデルに基づく 音声駆動型身体引き込みキャラクタシステム

瀬島 吉裕[†] 渡辺 富夫^{†,††} 神代 充^{††}

[†]岡山県立大学大学院 情報系工学研究科 ^{††}岡山県立大学 情報工学部

^{†††}科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業

本研究では、アバタを介したコミュニケーション時における人の眼球動作特性を解析し、その解析結果により頭部動作に基づいて眼球動作を自動生成する眼球動作モデルを提案している。さらに、眼球動作モデルを音声駆動型身体引き込みキャラクタ InterActor に適用したコミュニケーションシステムを開発し、アバタを介したコミュニケーション実験の官能評価により提案システムの有効性を示している。

A Speech-Driven Embodied Entrainment System Based on an Eye-Movement Model in Voice Communication

Yoshihiro SEJIMA[†] Tomio WATANABE^{†,††} Mitsuru JINDAI^{††}

[†]Graduate School of Systems Engineering, Okayama Prefectural University

^{††}Faculty of Computer Science and System Engineering, Okayama Prefectural University

^{†††}CREST of Japan Science and Technology Agency

In this paper, an eye-movement model generating eyeball movement based on head movement is proposed on the basis of the analysis of eyeball movement characteristics in an avator communication experiment. An advanced embodied entrainment communication system is developed in which the proposed model is applied to the speech-driven embodied entrainment character InterActor. The effectiveness of the system is demonstrated by the sensory evaluation of an avator communication experiment.

1 はじめに

近年、セカンドライフのようなネット上の3D仮想世界でCGキャラクタのアバタを介したコミュニケーションシステムが実用化されている^{1, 2)}。これらのシステムのアバタでは、あらかじめ用意された動作や表情がボタン操作で表現されるだけで、語りかけに対するうなずきや身振りなどの身体的リズムの引き込みによる身体性の共有は考慮されていない³⁾。著者らはこれまでに、対話時における音声と身体動作の時系列関係に着目し、対面コミュニケーションでの音声と身体動作の関係を分析した結果、円滑なコミュニケーションでは、聞き手の身体動作は頭部動作を主体としていることを明らかにしている。その解析結果に基づき、会話の音声のみを入力としてうなずきや身振り手振りなどの豊かなコミュニケーション動作を自動生成するiRT (InterRobot Technology) 技術を開発し、音声駆動型身体引き込みキャラクタ InterActor に実装することで、インタラクション支援・促進に

有効であることを示している⁴⁾。

一方、対面コミュニケーションでは、身体動作だけでなく、注視時間やアイコンタクトといった相互の視線情報が円滑なコミュニケーションに重要な役割を果たしていることが報告されている^{5, 6)}。アバタを介したコミュニケーションにおいても、アバタに視線情報を反映させることで、より一体感のあるコミュニケーションを支援できるものと期待される^{7) - 9)}。

そこで本研究では、アバタを介したコミュニケーション時における人の眼球動作特性を解析し、その解析結果により頭部動作に基づいて眼球動作を自動生成する眼球動作モデルを提案している。さらに、眼球動作モデルを音声駆動型身体引き込みキャラクタ InterActor に適用したコミュニケーションシステムを開発し、アバタを介したコミュニケーション実験の官能評価により提案システムの有効性を示している。

2 視線計測デバイス

視線の計測は、多くの研究によって様々な手法が考案されている。本研究では、対話者が頭部を自由に動作できることや対話者への負担の軽減などの観点から、頭部に装着し、赤外光により計測する視線計測デバイスを開発した(図1)。開発した視線計測デバイスの概略を図2に示す。対話者の眼前に、可視光を透過し赤外光のみを反射するダイクロミックミラーを配し、その反射画像をCCDカメラによって入力している。さらに、CCDカメラの前に赤外光のみを透過するオプティカルフィルタを備えることで、入力画像への可視光による外乱を軽減している。この入力画像から対話者の眼球の角膜位置を推定している。画像処理には予め用意した角膜のマスクパターンを用いたパターンマッチング手法を用いて認識を行っており、角膜の認識率は95%程度である。

3 視線情報を付与した身体的バーチャルコミュニケーションシステムの開発

仮想空間での対話者のコミュニケーション時における眼球動作を解析するために、著者らがこれまでに開発した身体的バーチャルコミュニケーションシステムに視線計測デバイスを併用したシステムを構築した。

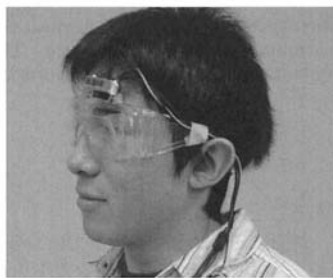


Fig. 1 視線計測デバイス

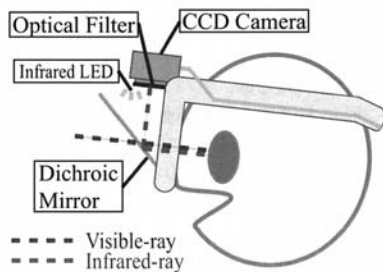


Fig. 2 視線計測デバイスの概略

3.1 身体的バーチャルコミュニケーションシステム

身体的バーチャルコミュニケーションシステムは、対話者が自己と相手の分身である VirtualActor (以下、VA) を介して対話者相互の身体性を共有し、仮想空間上で対面コミュニケーションを実現することができるシステムである(図3)。システムの対話場面例を図4に示す。本システムでは、VAの身体動作、韻律情報、それらのタイミングのずれによる影響など、各種情報を加工して人間のインタラクション・コミュニケーション特性を合成的に解析することができる¹⁰⁾。

仮想空間の構築には、バーチャルリアリティ開発用C言語ライブラリ(SENCE8 WorldToolKit)を用い、Windows XPを搭載したPCを使用している。対話者の身振りなどの上半身の動きを、対話者の頭部、背部、両手首に取り付けられた4個の磁気センサ(POLHEMUS FASTRAK)から、毎秒30Hzで位置及び角度情報をサンプリングし、VAの動作を合成している。また、音声データは、マイク付きヘッドフォンを用いて16bit 44100Hzでサンプリングしている。磁気センサデータ及び音声データはハードディスクに記録されると同時に

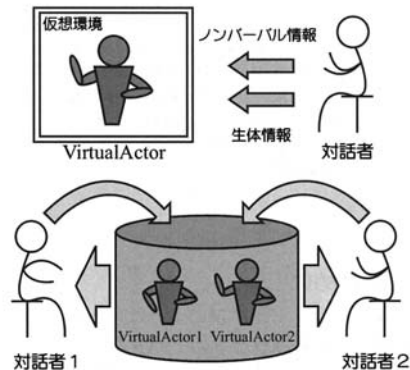


Fig. 3 身体的バーチャルコミュニケーションシステムのコンセプト

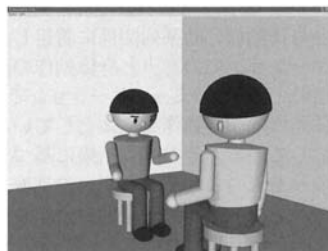


Fig. 4 対話場面例

ギガビットイーサネットを経由して、PC間での送受信を行っている。

3.2 視線情報を付与した身体的バーチャルコミュニケーションシステム

これまでの身体的バーチャルコミュニケーションシステムに視線計測デバイスにより計測した対話者の眼球動作をVAに付与したコミュニケーションシステムを構築した。システムの概略を図5に示す。CCDカメラによって得られた目領域の赤外光反射画像は、A-Dコンバータによりデジタルデータに変換されPCに入力される。このときの描画フレームレートは毎秒30フレームであり、対話者の眼球動作に対するアバタの眼球動作の遅れは約0.1秒である。

VAの眼球の回転角度は、対話者の角膜位置から以下のようにして算出する。赤外光反射画像から推定される角膜位置を x とし、角膜が正面にあるときの位置を基準位置 x_0 として予め定めておく。(1)式より、角膜位置 x の基準位置からのずれ量を角膜の移動距離 δ として算出する。この移動距離 δ から(2)式を用いてアバタの眼球の回転角度を算出する。ただし、 x_0 、 K 、 R については、被験者毎に調整する。

$$\delta = x - x_0 \quad (1)$$

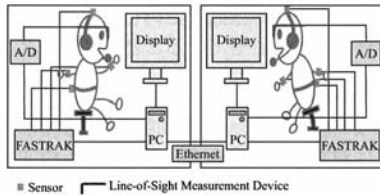


Fig. 5 システム概略図

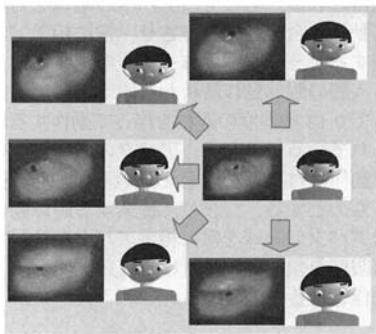


Fig. 6 対話者の眼球の動きに対するアバタの眼球

$$\theta = K \sin^{-1} \frac{\delta}{R} \quad (2)$$

θ : VAの眼球の回転角

x : 角膜位置

x_0 : 角膜が正面にある時の位置 (基準位置)

K, R : 変換用の係数

視線計測デバイスから得られる対話者の眼球動作の画像と、それに対応する仮想空間上のアバタの眼球動作を図6に示す。この図から対話者の眼球動作が仮想空間上のアバタに適切に反映されていることがわかる。

4 視線情報解析実験

アバタを介したコミュニケーション時における対話者の眼球動作を解析するために、視線情報を付与した身体的バーチャルコミュニケーションシステムを用いて2者間コミュニケーション実験を行った。

4.1 実験方法

本実験では、被験者に各室でディスプレイを見ながら対話を行わせた。ディスプレイには、ビデオコミュニケーションを想定し相手VAのみを表示した。各室の対話の様子はビデオカメラにより撮影した(図7)。本実験において、一方から他方へ伝達するコミュニケーションと、双方向でのコミュニケーションでは、視線情報の影響が異なると考えられ、話し手・聞き手に分かれて対話を行う役割対話実験と日常の談話を行う自由対話実験を行った。役割対話実験での対話内容は、容易に内容が伝達できる童話を採用した。

実験手順は、まず実験前に童話を読ませ、その後システムを5分程度使用させた。つぎに、話し手・聞き手にわかれて役割対話実験を3分間行い、その後話し手・聞き手を交代して同様の役割対話実験を3分間行った。最後に自由対話実験を3分間行った。被験者は18歳~24歳までの男女学生10組20人であった。

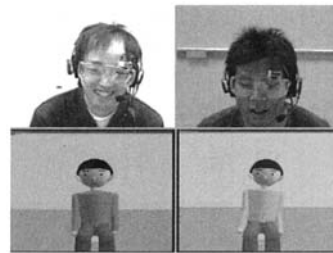


Fig. 7 システムを用いた対話場面の一例

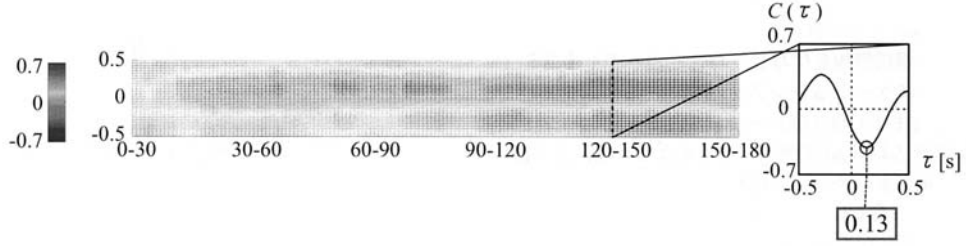


Fig. 8 頭部動作に対する眼球動作の相互相関関数 $C(\tau)$ と時系列変化の一例

Table 1 相手アバタを注視している時間的な割合

	話し手	聞き手	自由対話
平均	0.82	0.80	0.79
標準偏差	0.15	0.22	0.19

4.2 視線情報の解析

まず、各実験における相手アバタを注視している時間的な割合を計測するために注視点の解析を行った。解析では、相手アバタの顔を中心に半径10cmの円内に対話者の注視点が存在する場合に相手アバタを注視しているものとした。解析結果を表1に示す。表より、コミュニケーション時には対話者は約80%の割合で相手アバタを注視していることがわかる。

次に、対話者の頭部動作と眼球動作の動作特性に着目して解析を行った。頭部動作は、対話者の頭部につけた磁気センサによって得られた1/30sec毎の傾き方向の角度データ $p(i)$ の前後の角度データの差 $[p(i+1) - p(i-1)]$ から求まる角速度をその時点での動きの変化量として平滑化し、頭部動作のデータ $x(i)$ とした。眼球動作は、対話者に装着した視線計測デバイスによって得られた1/30sec毎の上下及び左右方向の座標データ $c(i)$ の前後のデータ差 $[c(i+1) - c(i-1)]$ から求まる速度をその時点での動きの変化量として平滑化し、眼球動作のデータ $y(i)$ とした。各対話者の頭部動作と眼球動作を以下の相互相関関数 $C(\tau)$ で評価した。

$$C(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} \{x(i) - \mu_x\} \{y(i+\tau) - \mu_y\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \{x(i) - \mu_x\}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \{y(i) - \mu_y\}^2}} \quad (3)$$

μ_x, μ_y : x, y の平均値, n : データ数, τ : 時間遅れ
話し手における左右方向（首振り方向）におい

て、分析対象を30秒として相互相関関数 $C(\tau)$ の分析区間を1秒ずつ移動させた時系列変化の一例を図8に示す。図より、120秒付近で強い負の相関が確認できる。これは、眼球動作が頭部動作に対して逆方向に運動しており、さらに0.13秒の遅れを伴っていることがわかる。聞き手においても話し手と同様の傾向が見られた。さらに、上下方向（うなずき方向）においても左右方向と同様の傾向が見られた。全実験における平均遅れ時間は 0.13 ± 0.07 秒であった。

以上の結果より、対話者はアバタを介したコミュニケーション時では、ほとんどの時間において相手アバタを注視しており、また、注視するために眼球を頭部動作に対して逆方向に運動させていると考えられる。さらに、頭部動作に対応して眼球を動作させる際、眼球は頭部に対して0.13秒程度の遅れを伴って動作させていることが明らかとなった。

5 眼球動作モデル

コミュニケーション時の眼球動作解析から、対話者は対話中のほとんどの時間において相手アバタを注視していることが示された。そのため、アバタの眼球を常に相手アバタを注視するように動作させることで、視線によるノンバーバル情報が付加され円滑なコミュニケーションが実現できると期待される。そこで、アバタの眼球を対話者の頭部動作に合わせて動作させ、常に相手アバタを注視するような眼球動作モデルを提案する。ただし、人間の眼球動作解析から眼球は頭部の動作に対して0.13秒程度の遅れを伴って動作する結果が得られていることから、アバタの眼球についても頭部動作に対して0.13秒の遅れを付加して動作させるものとする。つまり、提案する眼球動作モデルはアバタの眼球を常に相手アバタを注視するように眼球を頭部動作に対して0.13秒の遅れを伴って動作させるものである。

6 VirtualActorに視線情報を付与した身体的コミュニケーションシステム

眼球動作を自動生成する眼球動作モデルの有効性を確認するために、上述の身体的バーチャルコ

コミュニケーションシステムを用いてコミュニケーション実験を行った。身体的バーチャルコミュニケーションシステムでは、対話者の頭部動作をリアルタイムで計測し、アバタに反映している。そこで、提案する眼球動作モデルを導入し、対話者の頭部動作からアバタの眼球動作を自動生成する。ただし、対話者の頭部がディスプレイの方向に向いておらず、明らかに相手アバタを注視していない場合には、アバタの眼球を動作させなかった。

実験システムの概略を図9に示す。被験者には各室でディスプレイを見ながら対話を行わせた。各室の対話の様子はビデオカメラにより撮影した(図10)。ディスプレイに表示する場面は、視線を把握し易い観点から、相手VAを正面表示させた。被験者は18歳~23歳までの男女学生10組20人であった。

6.1 実験方法

4種類のモード(a)相手キャラクターの眼球が動作しないモード(眼球動作なし)、(b)相手キャラクターの眼球が頭部動作に対して逆方向に遅れなしで動作するモード(遅延なし)、(c)相手キャラクターの眼球が頭部動作に対して逆方向に0.13秒の遅れを伴って動作するモード(遅延0.13秒)、(d)相手キャラクターの眼球が頭部動作に対して逆方向に0.26秒の遅れを伴って動作するモード(遅延0.26秒)を提示してコミュニケーション実験を行った。

実験手順は、まず被験者に4種類のモードの違いが十分に分かるまでシステムに慣れさせた。その後、4種類のモードから2種類のモードをラン

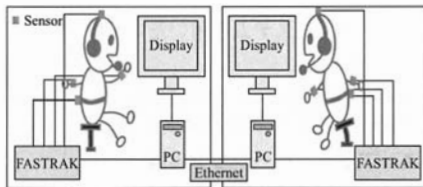


Fig. 9 システム概略図

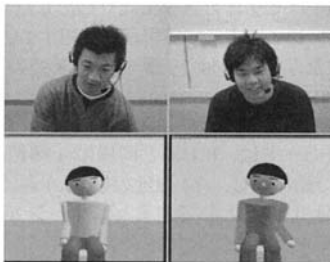


Fig. 10 システムを用いた対話場面の一例

Table 2 一対比較の結果

	(a)	(b)	(c)	(d)	Total
(a)	-	7	4	8	19
(b)	13	-	3	6	22
(c)	16	17	-	16	49
(d)	12	14	4	-	30

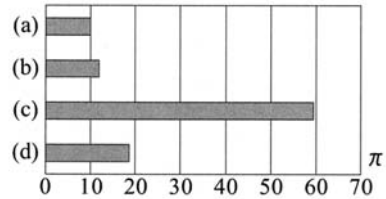


Fig. 11 各モードの強さ π

ダムに選定し、2種類のモードについてそれぞれ1分間ずつ対話させ、「総合的に良い」観点から一対比較させた。次に、各モードについて2分間の自由対話実験を行った。対話終了後、各モードについて「楽しさ」、「対話しやすさ」、「好み」、「相手からの視線(自然な視線)」、「一体感」、「共有感」の6項目について7段階(中立0)で官能評価させた。各モードの提示順は順序効果を考慮しランダムとした。

6.2 実験結果

一対比較の結果を表2に示す。表中の数字は各列に対し各行の表示をより好ましいと答えた被験者の数を表している。この結果から表示の好ましさを定量的に評価するために、以下に示す Bradley-Terry モデルを想定した¹¹⁾。

$$P_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (4)$$

$$\sum_i \pi_i = \text{const.} (= 100) \quad (5)$$

(π_i : i の強さの量, P_{ij} : i が j に勝つ確率)

π_i は4種類のモードにおけるモードの好ましさ(4モードの合計100)を表し、このモデルを想定することにより、一対比較に基づく好ましさを一義的に定めることができる。

Bradley-Terryモデルより推定されたモードの好ましさ π を図11に示す。このモデルの整合性を検討するために、適合度検定及び尤度比検定を行った結果、モデルは棄却されず、 π の妥当性が保証された。図11より、提案モデルである(c)が他のモードに比べて極めて高く評価されていることがわかる。次いで(d)、(b)の順となり、最も低く評

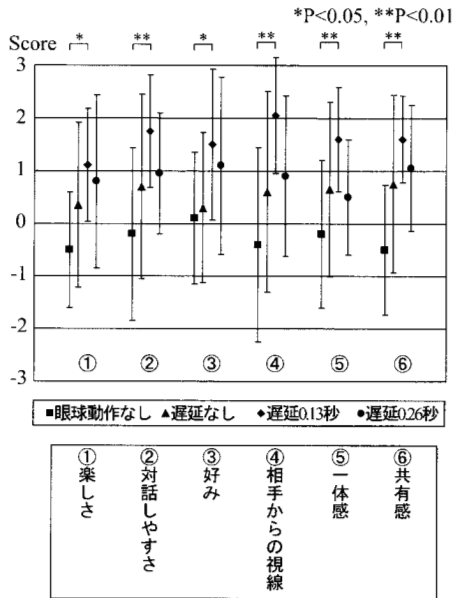


Fig. 12 7段階評価の結果

価されたのは従来の眼球が動作しないモード (a) であった。

また、7段階評価の結果を図12に示す。眼球が動作するモード (b), (c), (d) は、眼球が動作しないモード (a) に対して、全体的に評価が高い傾向にある。とくに、提案モデル (c) は、眼球が動作しないモード (a) のモードに対して、全ての項目について有意水準 1% または 5% の有意差が認められた。

これらのことから、頭部動作から眼球動作を生成する際に、人間と同様に頭部動作に対して眼球動作に 0.13 秒の遅れを伴わせることが有効であることが示された。眼球動作モデルは人間の眼球動作解析を基にして頭部動作から眼球動作を自動生成しており、またアバタの頭部動作は対話者の頭部動作を直接反映しているため、アバタの眼球動作を違和感なく生成している。

7 InterActor に視線情報を付与した身体的コミュニケーションシステム

著者らは、対面コミュニケーションにおける音声と身体動作の時系列関係に基づき、対話者の発話音声のみからキャラクターのコミュニケーション動作を自動生成する iRT 技術を開発している⁴⁾。この iRT 技術を CG キャラクターに応用した InterActor を図 13 に示す。InterActor は、発話音声に基づいてうなずきや身振り・手振りなどのコミュニケーション動作を自動生成し、話し手や聞き手として振舞う。この InterActor に提案する眼球動作モデルを付加することで、InterActor の頭部動作に伴

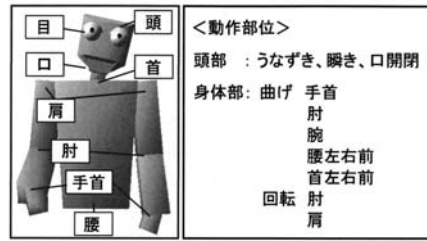


Fig. 13 InterActor

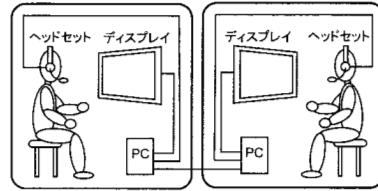


Fig. 14 システム概略図

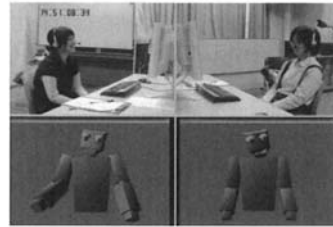


Fig. 15 システムを用いた対話場面の一例

う眼球動作が音声のみから自動生成されるコミュニケーションシステムを構築した。

7.1 コミュニケーション実験

新たに構築したシステムの有効性を確認するために遠隔コミュニケーション実験を行った。実験システムの概略を図 14 に示す。被験者には各室でディスプレイを見ながら対話を行わせた。各室の対話の様子はビデオカメラにより撮影した (図 15)。ディスプレイに表示する場面は、相手 IA を正面表示させた。被験者は 18 歳～23 歳までの男女学生 15 組 30 人であった。

実験方法

比較モードは、6.1 節と同様に 4 種類のモード (a) 眼球動作なし, (b) 遅延なし, (c) 遅延 0.13 秒, (d) 遅延 0.26 秒としてコミュニケーション実験を行った。

実験手順は 6.1 節と同様の手順で行った。アンケート項目は「楽しさ」、「対話しやすさ」、「好み」、「相手からの視線 (自然な視線)」、「一体感」、「共

Table 3 一対比較の結果

	(a)	(b)	(c)	(d)	Total
(a)		7	4	1	12
(b)	23		5	16	44
(c)	26	25		27	78
(d)	29	14	3		46

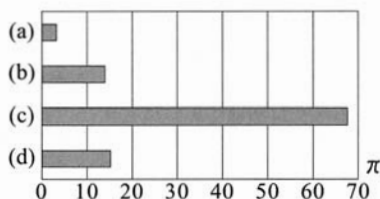


Fig. 16 各モードの強さ π

有感」,「生命感」の7項目とした. 各モードの提示順は順序効果を考慮しランダムとした.

実験結果

一対比較の結果を表3に示す. この結果から Bradley-Terry モデルでのモードの好ましさを図16に示す. 適合度検定及び尤度比検定において, モデルは棄却されず, π の妥当性が保証された. 図16より, 提案モデルであるモード(c)が他のモードに比べて極めて高く評価されている. 次に(d), (b)の順となり, 最も低く評価されたのは(a)のモードであった.

また, 7段階評価の結果を図17に示す. 眼球が動作するモード(b), (c), (d)は, 眼球が動作しないモード(a)に対して, 全ての項目で有意水準1%の有意差が認められた. さらに, 提案モデル(c)は, モード(b), (d)に対して「好み」,「相手からの視線」,「一体感」,「共有感」の項目で有意水準5%で有意に高く評価された.

これらのことから, 眼球が動作するモードが好まれ, とくに0.13秒遅延の提案モデルが高く評価された. これは, 従来のInterActorよりも提案モデルを付加した本システムの有効性を示すものである.

7.2 視線はずし実験

前節では, InterActorに提案する眼球動作モデルを適用することの有効性を示した. しかし, この手法ではわずきや瞬きなどを除くと, 常に対話者を注視するため, 対話者に威圧感を与えている可能性がある. また, 人間のコミュニケーション時の眼球動作解析では相手アバタを注視している時間的な割合では80%であったのに対し, InterActorが相手アバタを注視している時間的な割合は85%であった. そこで, 適度に視線をはずす(視線はず

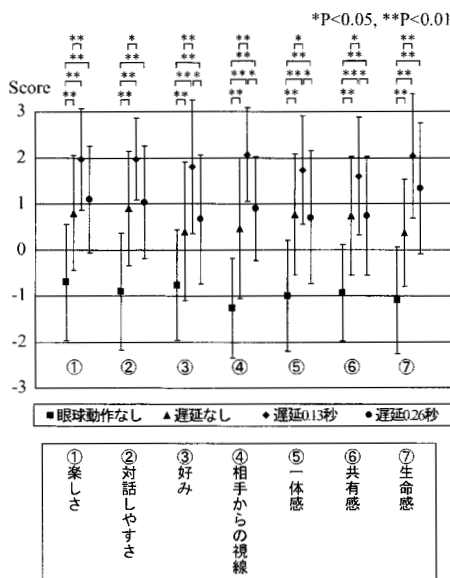


Fig. 17 7段階評価の結果

し)機能を眼球動作モデルに付加する. 視線はずしでは, 藤田らの提唱する一定時間が経過すると眼球を下方へ5°移動させる動作を指数分布的に生成し⁹⁾, InterActorが相手アバタを注視している時間的な割合を80%となるようにした.

実験方法

実験システムおよびディスプレイに表示するキャラクターの配置は6.1節と同様である. 比較モードは(a)相手キャラクターの眼球が動作しないモード(眼球動作なし), (b)相手キャラクターの眼球が頭部動作に対して逆方向に0.13秒の遅れを伴って動作するモード(視線はずしなし), (c)相手キャラクターの眼球が頭部動作に対して逆方向に0.13秒の遅れを伴って動作し, 一定時間が経過すると視線はずしを行うモード(視線はずしあり)としてコミュニケーション実験を行った. 実験手順は, 6.1節と同様の手順で行った. 被験者は18歳~23歳までの男女学生15組30人とした.

実験結果

一対比較の結果を表4に示す. Bradley-Terryモデルで推定されたモードの好ましさを図18に示す. 適合度検定及び尤度比検定において, モデルは棄却されず, π の妥当性が保証された. 図18よりモード(c)が他のモードに比べて高く評価されている. 次に(d), (a)の順で評価された.

また, 7段階評価の結果を図19に示す. モード(b), (c)は, モード(a)に対して, 全ての項目で有意水準1%または有意水準5%の有意差が認められた. さらに, モード(c)は, モード(b)に対して,

Table 4 一対比較の結果

	(a)	(b)	(c)	Total
(a)		3	3	6
(b)	27		11	38
(c)	27	19		46

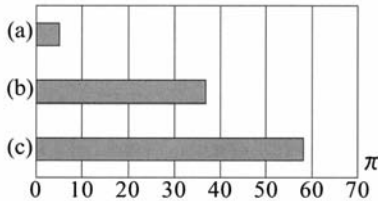


Fig. 18 各モードの強さ π

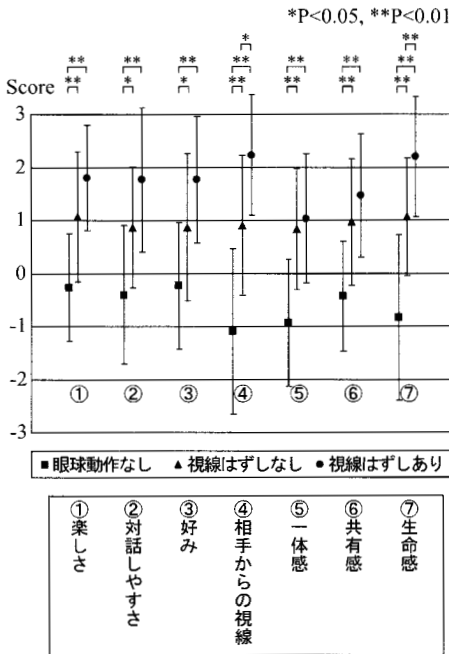


Fig. 19 7段階評価の結果

「相手からの視線」の項目で有意水準 5%、「生命感」の項目で有意水準 1%の有意差が認められた。これらのことから、眼球が動作するモードが好まれ、さらに視線はずしを行うモード (c) が高い評価を得ていることから、常に対話者を注視するのではなく、適度な視線はずしを導入することで、「相手からの視線」や「生命感」が向上することが示された。

このことから、提案する眼球動作を InterActor

に単に適用するのではなく、人間の注視時間に関する特性を基にした視線はずし動作を併用することで、効果的なアバタの眼球動作が生成されることが示された。

8 おわりに

本研究では、アバタを介したコミュニケーション時における人間の眼球動作特性を解析し、その解析結果に基づいた眼球動作を自動生成する眼球動作モデルを提案した。さらに、眼球動作モデルを身体的バーチャルコミュニケーションシステムに適用したコミュニケーションシステムを開発し、それを用いたコミュニケーション実験により眼球動作モデルの有効性を示した。

この知見を基に、会話音声から頭部動作を自動生成する音声駆動型身体引き込みキャラクタ InterActor に眼球動作モデルを適用したシステムを開発し、コミュニケーション実験により本システムの有効性を示した。さらに、眼球動作モデルに視線はずし動作を併用することの有効性を示した。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」における「人を引き込む身体性メディア場の生成・制御技術」プロジェクトの支援による。

参考文献

- 1) <http://secondlife.com/>
- 2) <http://www.koei.co.jp/>
- 3) 渡辺：コミュニケーションにおける身体性；ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 14-18 (1999).
- 4) Watanabe, T., Okubo, M., Nakashige, M., Danbara, R.: InterActor: Speech-Driven Embodied Interactive Actor; *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 17, No. 1, pp. 43-60 (2004).
- 5) 大坊：しぐさのコミュニケーション—人は親しみをどう伝えあうか；サイエンス社 (1998).
- 6) 松尾：コミュニケーションの心理学；ナカニシヤ出版, pp. 44-48 (1999).
- 7) 高木, 竹田：CG 人物像の視線移動のための頭部と眼球の動きモデル；電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-A, No. 8, pp. 1304-1311 (1997).
- 8) 伊藤, 角所, 美濃：親密性平衡モデルに基づく CG キャラクタ同士の会話映像における雰囲気制御；電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 735, pp. 37-42 (2003).
- 9) 石井, 宮島, 藤田：アバタ音声チャットシステムにおける会話促進のための注視制御；ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 論文集, pp. 705-708 (2006).
- 10) 渡辺, 大久保, 石井, 中林：バーチャルアクターとバーチャルウェブを用いた身体的バーチャルコミュニケーションシステム；ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 2, No. 2, pp. 1-10 (2000).
- 11) 竹内：現象と行動の中の統計数理, 新曜社 (1978).