

ユーザと対面するバーチャルキャラクターの 自然な眼球運動モデルの生成

中本 智子^{1,a)} 鶴野 玲治^{2,b)}

概要: 本論文では、人とバーチャルキャラクターが対面した場面を想定して、バーチャルキャラクターの眼球運動モデルの生成を行う。人間が他者の顔を見つめる時の視線は、相手の目や鼻などの特徴点を経時的に推移することが知られている。本研究ではそのことに着目し、自然に他者の顔を見つめるような統計的な眼球運動モデルを、実測値に基づいて構築した。また眼球運動と同時にユーザを適切に見つめる動作に伴う頭部の動きの生成も行った。本手法を用いた眼球運動モデルとユーザの顔の部位の位置の情報を組み合わせ、眼球運動を生成する事により、ユーザを適切に見つめるような眼球運動の生成が可能となった。

Natural Looking Eye Movement Model of Virtual Character for Face-to-Face Interaction.

TOMOKO NAKAMOTO^{1,a)} REIJI TSURUNO^{2,b)}

1. はじめに

本論文では、人と人が対面した時のような眼球運動の生成を行う。人間の眼球は常に静止しているわけではない。人間の眼球は常に動き続けている。私たちが他者の目を覗き込んだとき、眼球が常に動き続けている様子が観察できる。

目の動きは完全にランダムに発生しているものではなく、人は興味や関心の対象に視線を重点的に向ける [1]。また、他者の顔を見る際には、人は他者の目や鼻などの部位に重点的に視線を向ける [1], [2], [3]。

目の動きは、コンピューターグラフィックス (CG) で、バーチャルキャラクターという形で人間を表現する際にも考えなければならない重要な要素の一つである。初期の CG のキャラクターは目が静止して不自然な印象を与えていた。しかしながら、眼球運動をバーチャルキャラクターに反映するための研究が行われ、バーチャルキャラクターに自然な眼

球運動を付与する試みが数々行われている [4]。結果、バーチャルキャラクターが与える違和感が軽減されている。

しかしながら、実際にバーチャルキャラクターの眼球運動モデルは、まだ若干の違和感が残っている。

また、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 技術の発達により、ユーザが CG で構成されたバーチャルの世界に没入し、バーチャルキャラクターと対面する体験をすることが可能になっている。バーチャルキャラクターがユーザの顔を見つめるという現象も多く発生する。

眼球運動は、コミュニケーションに於いて大きな役割を担っており、バーチャルキャラクターとユーザが対面するという場面でも重要な要素の一つである。よって、バーチャルキャラクターと対面した時、ユーザが違和感を抱かない手法が必要である。本論文では、そのような問題を解決するために、対面時の違和感を軽減するような眼球運動モデルの生成を行う。本手法では、対面時に人は他者の顔の部位に重点的に視線を向けることから、他者の顔の部位の遷移順と注視時間に着目して眼球運動の実測値の取得を行う。その実測値を元にして統計的な眼球運動モデルの生成を行う。本手法によって生成した眼球運動モデルとユーザの顔の部位の位置の情報を利用して、人の顔を見つめるような

¹ 九州大学大学院芸術工学府
Shiobaru 4-9-1, Minamiku, Fukuoka 815-8540, Japan

² 九州大学大学院芸術工学研究院
Shiobaru 4-9-1, Minamiku, Fukuoka 815-8540, Japan

a) moko@verygood.aid.design.kyushu-u.ac.jp

b) tsuruno@design.kyushu-u.ac.jp

バーチャルキャラクターの眼球運動を生成する。対面時の自然な眼球運動を生成することが本手法の目的である。

2. 関連研究

2.1 眼球運動に関する研究

人間の眼球運動に関する研究は数多く行われ、それらの研究の中で人間の視線はコミュニケーションにおいて重要な役割を担っている。

人間の目は、他の動物とは違い、白目と黒目がはっきりわかる構造をしているが故に、視線がどこに向いているかがわかりやすい構造をしている [5]。そのような構造をしている目から生成される人間の視線は、コミュニケーションにおいて大きな役割を果たしており [6]、人間の視線の動きに着目した研究も数多く行われている。

その中で、人間の視線はランダムに遷移しているのではなく、注意や興味の対象に視線が重点的に向けられることが判明している [1]。人間が他者の顔を認識するときの眼球運動に関する研究も行われており、人は他者の顔を認識するときには、目、鼻、口などの顔のパーツに重点的に視線を向ける [1], [2], [3]。人間が他者の顔を注視する際の視線動作には、個人差があり、文化 [2] や、対人恐怖症かどうか [3] によっても、どのような点に着目して他者の顔を注視するかが違う。

2.2 バーチャルキャラクターへの眼球運動の付与

バーチャルキャラクターに眼球運動を付与するための研究は数多く行われている [4]。

実測値を元に眼球運動モデルを構築する手法としては、サケード運動に着目して実測値を元にした眼球運動モデルの構築 [7], [8] などが行われている。

また、特定の場面や動作に関連する眼球運動を生成する手法としては、ボールをキャッチするときの目の動きを含む動作の生成 [9]、会話に連動した頭部の動きと眼球運動を生成する手法 [10] が提案されている。

また音声や動画などの、外部入力情報を元にしてその入力に適切な眼球運動を生成する研究も行われている。その中で、台詞などの音声データから人型アバタの眼球運動、まばたき、頭部の動きなどを生成する手法 [11]、動画を入力として、入力動画の中の顕著な物体を追うような眼球運動と頭部の動きを生成する手法 [12] が提案されている。

3. 手法

3.1 眼球運動モデルの概要

本手法では、人が他者の顔を見つめる時の眼球運動の実測値から眼球運動モデルを生成することにより、ユーザを見つめるような視線動作を伴ったバーチャルキャラクターの生成を行う。システムの概要は図 1 のようになる。

本手法は、利用開始時にユーザが指定した顔の部位の位

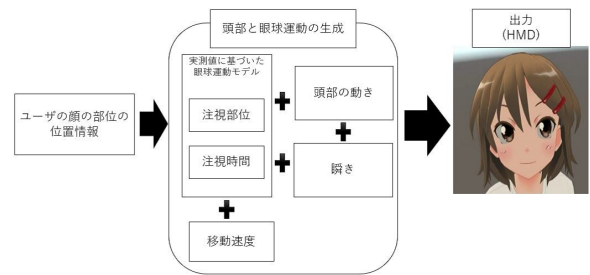


図 1 システムの概要図

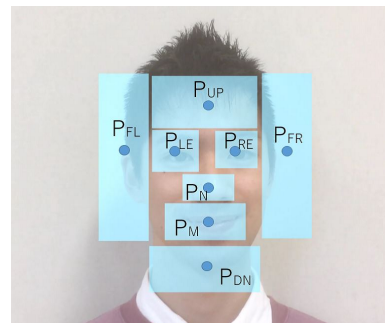


図 2 本手法で対象とする顔の部位

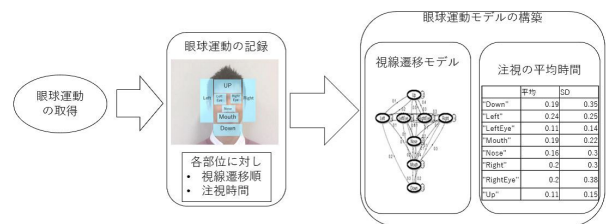


図 3 実測値を元にした眼球運動モデルの構築の概要

置と、VR の HMD の位置からユーザの位置と顔の部位の位置を検出する。それを元にして、眼球運動モデルを適用を行う。眼球運動モデルは人の顔を見つめる時の眼球運動の実測値から構築を行う。本論文で利用する眼球運動モデルは、人の顔の部位毎の注視時間、遷移順の 2 点に着目して構築を行う。その実測値から生成した眼球運動モデルに加え、眼球運動の速度、目の動きの最大角度、前庭動眼反射を考慮した上でその眼球運動モデルを適用する。また VR 空間上では、ユーザが自由に動けるため、首が動かない場合不自然な印象を与えてしまうため、首を適切にユーザの方向へ向けるように設定する。

本論文では、目が大きくて眼球の動きがわかりやすいという理由で目の大きなアニメ顔のバーチャルキャラクターを対象として眼球運動の付与を行う。

3.2 実測値による眼球運動モデル

3.2.1 実測値による眼球運動モデルの概要

本手法では、他者の顔を見る時の眼球運動の実測値から、眼球運動モデルの生成を行う。本手法では、ひとりの人物

の顔が正面からバストアップで映った動画を提示し、その動画に映っている人物の顔を見つめる時の眼球運動を図2の部位に着目して取得する。その眼球運動の情報を元にして視線遷移、注視時間から構成される眼球運動モデルを生成する。眼球運動モデルの構築手法の概要は図3となる。

眼球運動モデルを適用する際は、3.2.2で定義する視線遷移行列で視線の遷移先を決定し、その後遷移終了後に3.2.3を用いて遷移先の顔の部位に視線が停止する注視時間を定義する。注視時間終了後、視線遷移行列で次の視線の遷移先を決定し、視線遷移終了後、定義された注視時間ほどその顔の部位に視線を停止させるということを繰り返す。

尚、眼球運動には個人差があるため[2]、無作為に選んだ一人の眼球運動から眼球運動モデルを生成する。本論文では、日本人20代女性1名の眼球運動から眼球運動モデルを生成する。

3.2.2 視線遷移モデル

本手法では、図2で示すような、顔全体の中から額P_{UP}、左目P_{LE}、右目P_{RE}、顔左側P_{FL}、顔右側P_{FR}、鼻頭P_N、口P_M、顎P_{DN}で示された部位をどのような順序で見つめたかを元に、視線遷移の遷移確率モデルを生成する。本論文では、図2の四角で囲った範囲を注視していたら、その部位を見つめている状態であると定義する。本論文では、P_{UP},P_{LE},P_{RE},P_{FL},P_{FR},P_N,P_M,P_{DN}の状態に対して離散時間マルコフ連鎖を用い、取得したデータから式(1)のような遷移行列を生成する。遷移先のP_nのnは式(1)で定義される。

$$P_n = \begin{pmatrix} P_{DN} & P_{FL} & P_{LE} & P_M & P_N & P_{FR} & P_{RE} & P_{UP} \\ 0.2 & 0.2 & 0 & 0.4 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.3 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_{DN} \\ P_{FL} \\ P_{LE} \\ P_M \\ P_N \\ P_{FR} \\ P_{RE} \\ P_{UP} \end{matrix} \quad (1)$$

本論文では、初期状態は一律にP_{FR}から始まると定義し、その後の眼球運動の遷移を数式1で定義する事とする。バーチャルキャラクターの注視点となる対象は、図2で示した各部位の中心点とする事とする。

3.2.3 注視時間

本手法では、図2の顔全体の中からP_{UP},P_{LE},P_{RE},P_{FL},P_{FR},P_N,P_M,P_{DN}の注視時間の平均と標準偏差(SD)の値を求め、各部位の平均±SDを各部位の注視時間とした。注視時間の対応は表1である。

3.3 眼球運動の速度

本手法では眼球が次の注視点へ遷移する際に、眼球運動

表1 部位毎の注視時間

	Average (s)	SD (s)
P _{DN}	0.19	0.35
P _{FL}	0.24	0.25
P _{LE}	0.11	0.14
P _M	0.19	0.22
P _N	0.16	0.3
P _{FR}	0.2	0.3
P _{RE}	0.2	0.38
P _{UP}	0.11	0.15

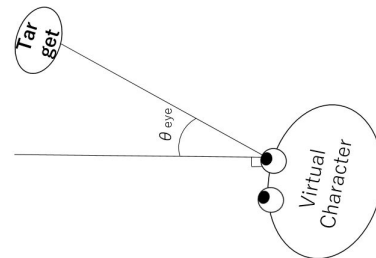


図4 眼球と物体の角度theta_eye

の速度の付与を行う。本手法では、その時見つめている対象から次の注視点の距離を1とした時に、毎フレーム0.8ほど移動する事とする。そのような事によって、眼球が飛んでいるような印象をユーザに与える事を防ぐ。

3.4 眼球回転角度の制限

目が極端に回転した場合、白目になりユーザに不自然な印象を与えるため、本論文では眼球回転角theta_eye(図4)に閾値を設ける。本論文の場合、眼球に対して物体の角度theta_eyeが20°の場合を眼球の回転の最大角と定め、|theta_eye| > 20°の場合眼球を回転させないこととする。

人間は首を動かした際に、頭の動きとは反対方向へ目を動かす前庭動眼反射が知られている。

本論文では、眼球が停止している時には前庭動眼反射の付与を行う。前庭動眼反射を適用する際には、頭の回転が(theta_x, theta_y, theta_z)であった際、眼球の回転を(-theta_x, -theta_y, -theta_z)と定義した。

本論文では、定義した目が動く限界範囲、|theta_eye| > 20°を超えた際、前庭動眼反射を適用し、眼球が停止し続け不自然な印象をユーザに与える事を防ぐ。

3.5 首の動きの付与

本論文では、自然にユーザの方向を向くように、注視点とバーチャルキャラクターの角度thetaが一定以上になったら首が顔の中心を向くような設定を行なう。Stahlの研究[13]により、目だけで物体を追う範囲は0°~67.7°と判明している。よって、本論文では、その間の値に位置し3.4で定めた眼球の回転角度の閾値である、ユーザとバーチャル

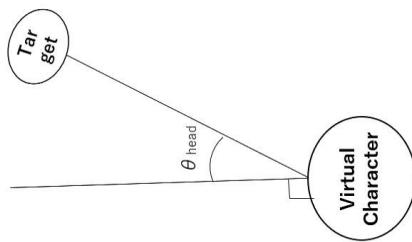


図 5 パーチャルキャラクターの頭部と物体の角度 θ_{head}

キャラクターの頭の角度 θ_{eye} が、 $-20^\circ < \theta_{eye} < 20^\circ$ の範囲を超えた場合、首をユーザの顔の位置へ向けるように定義する。

また Stahl の研究 [13] により、首の動く範囲は $0^\circ \sim 139.9^\circ$ と知られている。よって本論文では首の回転範囲を 139.9° とし、左右に等しく首の回転範囲を設ける為、 139.9° を 2 で割った 76.4° を左右それぞれに対しての首の回転範囲と定めた。よって、首の回転角度 θ_{head} (図 5) は、 $-76.4^\circ < \theta_{head} < 76.4^\circ$ の範囲で可動する事とする。

3.6 瞬きの付与

本研究では、瞬きの付与も行った。一定間隔で行うランダムな瞬きを付与した。

また、頭が一定の角度以上動いた際や大きなサッケードが発生した際に瞬きが発生することが知られている [14] ことにより、頭の角度が一定以上に変化した際に発生するように設定する。本論文では、頭の回転 θ_{head} と眼球の回転角度 θ_{eye} とした時、 $|\theta_{head} - \theta_{eye}| > 20^\circ$ の場合、大きなサッケードが発生したと定義し、瞬きが発生するようにする。

3.7 顔の部位の位置の定義

本手法では、HMD を被ったユーザの顔の位置を検出するために、HMD の位置を基準とした顔の部位の相対位置を与える。顔の部位の相対位置の情報は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) から自動的に取得できないため、ユーザが利用開始時に手で定義することによって設定を行う。

ユーザは利用開始時に、ある一点を見つめたバーチャルキャラクターを提示される。ユーザはコントローラで視線を上下左右に操作する事によって、図 2 の対象とする顔の各位置に視線が向くようにキャラクターの視線を操作することによって、顔の部位の定義を行う。人間は、他者の視線方向を高い精度で判別できる事が判明している [15] ことにより、この方法によって顔の部位を定義する事によってかなり正確に眼球運動のための顔の部位の定義が可能である。設定後は HMD の位置が得られればバーチャルキャラクターを基準としたユーザの顔の部位の方向は一意に求まる。

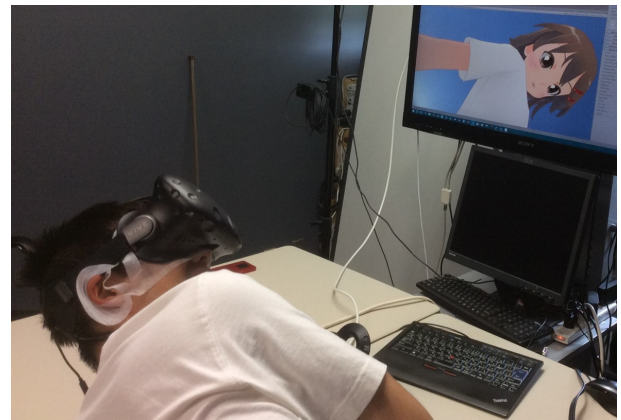


図 6 本システムを利用しているユーザ

4. 結果

4.1 動作環境

本手法を用いたバーチャルキャラクターを、Intel(R) Core(TM)i7-3960X CPU @ 3.30GHz 3.30 GHz, RAM 64.0 GB Windows10 を搭載したコンピュータと HTC VIVE を用いて動作させた。Unity のバージョンは 5.6.0f3 を用いた。

バーチャルキャラクターの 3D モデルにはプロ生ちゃん^{*1}の MMD モデルを MMD4Mecanim^{*2}を用いて Unity で利用できるものを用いた。眼球運動の測定には、Fove と Unity20171.0f.3 を用いた。眼球運動モデルの構築には、R[16] と R の markovchain パッケージ [17] を用いた。図 6 は本システムを利用しているユーザの様子である。

4.2 本手法を用いたバーチャルキャラクター

本手法を用いて生成したバーチャルキャラクターは図 7 のようになった。本手法を用いることにより、VR 空間上でユーザの位置と顔の部位の位置を意識したユーザを自然に見つめるような眼球運動の生成がリアルタイムに可能になった。

またそのことにより、バーチャルキャラクターが絶え間なく動いている場合や、バーチャルキャラクターよりもユーザの身長が高い場合や低い場合でも、首や眼球の位置などがユーザの位置に合わせて適切に動くため、ユーザを適切に見つめるような眼球運動をリアルタイムに生成することが可能になった。

4.3 実際の人間の眼球運動と、本手法の比較

本手法を用いた眼球運動のデータか QGIS[18] を利用してヒートマップを作成した。人物の正面からの顔写真を見つめた時の視線の動きを 1 フレームごとに取得し、可視化した。結果は図 8 のようになった。色で塗りつぶされた部

*1 ©2017 Pronama LLC

*2 <http://stereoarts.jp/>

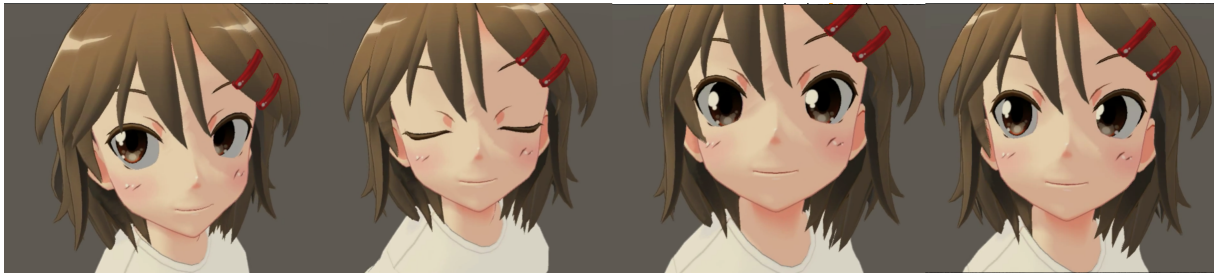


図 7 本手法で生成された眼球運動

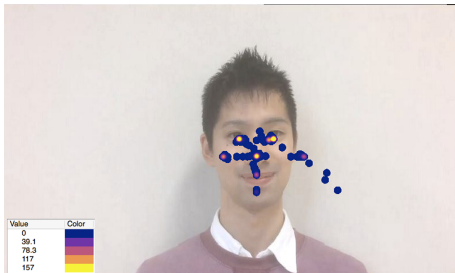


図 8 本手法で生成した視線データのヒートマップ

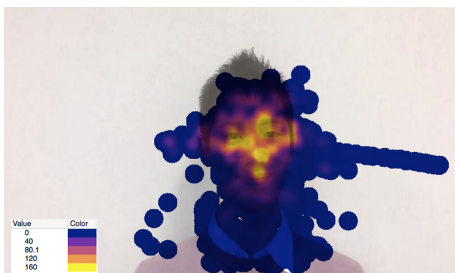


図 9 実際の人間の視線データのヒートマップ

分が注視された部分であり、黄色に近い色の方が重点的に見られているという事を示している。よって目や鼻といった顔の部位に視線が遷移して、各部位の中心を重点的に視線を向けている事がわかる。この図から、本手法を用いる事によって、人の顔のパーツに視線を向けている事が可能になった事がわかる。

また実際の人間の視線データを同じ顔写真に対して取得を行い、ヒートマップを生成した。結果は図 9 のようになった。この図も色で塗りつぶされた部分が注視された部分であり、黄色に近い色の方が重点的に見られているという事を示している。図からは、目や鼻などといった部分が重点的に見られている事を示す黄色で塗りつぶされており、実際の人々が他人の顔を見る時には、視線も顔の部位に中心的に視線を向けている事がわかる。

よって本手法を用いた視線遷移の眼球運動モデルで生成された眼球運動と、実際の人間の眼球運動は、視線を遷移しつつ、顔の各部位に重点的に視線を向けるという点では同じである事が確認できた。

表 2 注視時間の対応表

部位	注視時間 (ms)
鼻の中央	459.42
右目	408.21
左目	408.21

4.4 眼球運動の違いがユーザに与える印象

4.4.1 眼球運動の違いがユーザに与える印象について

眼球運動のどのような要素が、見つめている感じをユーザに与えるかを調査するために被験者実験を行なった。本論文では、眼球運動の遷移の有無と、眼球運動が顔の部位に着目して行われた場合どのような印象を与えるのかを被験者実験を通して検討を行なった。

そのような事の検討を行う為に、簡易的に顔の部位を見つめるような視線動作を伴ったバーチャルキャラクターと、顔面の方向を追跡するような視線動作を伴ったバーチャルキャラクターの比較を 4.4.3 で、簡易眼球運動モデルランダムな視線動作を伴ったバーチャルキャラクターの比較を 4.4.4 で行なった。

その結果、自然さや見つめられ感を生成する眼球運動の要素として、

- 顔の部位を遷移するような眼球運動
- 顔の部位に着目して行う眼球運動

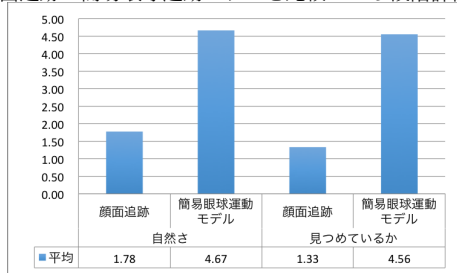
が必要なパラメータである事を確認できた。これらの要素について更に調査を進める。

4.4.2 簡易的に顔の部位を見つめるような簡易眼球運動モデル

本論文では、顔の部位を遷移する眼球運動モデルがどれぐらい有効であるかを調査するために、簡易的に顔の部位に着目して眼球運動を行うような簡易眼球運動モデルを生成した。簡易眼球運動モデルは、顔の部位を見つめる時間と遷移する順番に着目して構築した。どのぐらいの時間顔のパーツを見つめるかという点では、Kano らの研究 [19] の、人が他人の顔を見つめる際のパーツ毎の注視時間のデータを利用して表 2 のように設定した。

視線の遷移順の決定には Walker-Smith らの研究 [20] の顔をどのような順番で見るとかのデータの一例、(鼻の中心→左目→鼻の上部又は右目)を用いた。本研究では、鼻の上部または右目を見る部分は、一概に右目をみるように設

表 3 顔面追跡と簡易眼球運動モデルを比較した 5 段階評価の平均値



定するようにする。また、鼻の中心は顔の中心と考え、顔の中心を見るように設定した。よって本研究では、1:顔の中心→2:右目→3:左目の順で繰り返し遷移するように設定した。

4.4.3 顔の部位を遷移する眼球運動に対する検討

顔の部位を絶え間なく遷移するような眼球運動がどれぐらいユーザに与える印象に影響するのかの調査を行なった。その為に、顔の中心を一点追跡する顔面追跡を行う顔面追跡眼球運動と、4.4.2 で生成した簡易眼球運動モデルの比較を行なった。

その二つの眼球運動が与える影響を調査する為、4.4.2 で生成した簡易眼球運動モデルと顔面追跡を行うバーチャルキャラクタをモニター上に表示し、被験者にアンケートに答えてもらった。このアンケートでは、顔の部位の位置は、モニタ上に設置した Web カメラを用いて、OpenCV でユーザの顔の部位を検出する事によって取得する。被験者は 20 代の男女 9 名である。

なお被験者には、ランダムな順序で刺激を提示し、どちらがどのような意図で生成されているモデルかは伝えずアンケートに答えてもらった。

以下のような設問に 5 段階評価で回答してもらうような設問を被験者に行なった。

- 眼球運動が自然に見えましたか (5) ? それとも不自然に見えましたか (1) ?
- バーチャルキャラクタあなたを見つめているように見えましたか (5) ? それとも見つめてないように見えましたか (1) ?

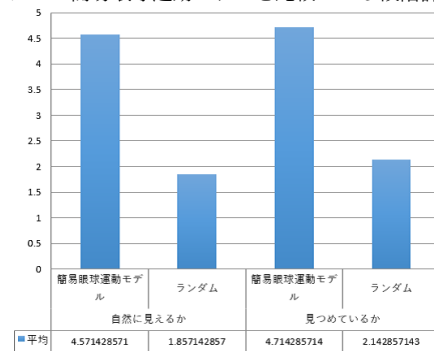
数値が高いほど、より自然または、みつめているように見えることがわかる。アンケート結果の平均値を棒グラフにすると表 3 のようになった。自然さ、みつめているように感じたかに関する結果をカイ二乗検定で検定したところ、自然さに感しても、みつめている感に感しても、検定結果は $P < 0.01$ であり、有意水準 5 パーセントで有意差が認められた。

よって、顔の一部を追跡するだけではなく、顔の部位を追跡し、視線を遷移させる事が、自然さを感じさせる為に有効な手段である事が確認できた。

4.4.4 遷移し続ける眼球運動に対する検討

また、顔の部位に着目して眼球を動かす視線動作がどの

表 4 ランダムと簡易眼球運動モデルを比較した 5 段階評価の平均値



ように影響しているのかの調査を行なった。

そのために、ランダムに動かす視線運動と 4.4.2 で生成した簡易眼球運動モデルの比較も行なった。ランダムに眼球を動かすバーチャルキャラクタは、常にユーザの方向へ首を向け、0~3.0ms 間のランダムな間隔で眼球を -20° ~ 20° の範囲でランダム回転させる事によって作成した。

簡易眼球運動モデルを用いたものとランダムな眼球運動の両方を HMD 内に表示し、被験者にアンケートに答えてもらった。被験者は 20 代の男女 7 名である。被験者には以下のような質問に答えてもらった。簡易眼球運動モデルとランダムに関して、自然さ、みつめているように見えるかに関する評価を行うために以下の質問をそれぞれに対して行った。なお被験者には両方をランダムな順序で提示し、どちらがどのような意図で生成されているモデルかは伝えずアンケートに答えてもらった。

- 眼球運動が自然に見えましたか (5) ? それとも不自然に見えましたか (1) ?
- バーチャルキャラクタあなたを見つめているように見えましたか (5) ? それとも見つめてないように見えましたか (1) ?

数値が高いほど、より自然または、みつめているように見えることがわかる。

アンケート結果の平均値を棒グラフにすると表 4 のようになった。

また結果をウィルコクソンの順位和検定で検定を行なった。その結果、自然さに感しても、みつめている感に感しても、検定結果は $P < 0.01$ であり、有意水準 5 パーセントで有意差が認められた。

よって、視線を動かし続けるだけではなく、顔の部位を遷移しながら追跡することは、自然さやみつめられている感をユーザに感じさせる為には有効な手法である事が確認できた。

5. 結論

本研究では、人間が他者の顔を見つめる時の眼球運動に着目し、実測値から生成した眼球運動モデルと顔の部位の

位置の情報を元に、VR空間上のユーザを適切に見つめるような眼球運動の生成を行った。また、適切にユーザの方向を見つめるような頭部の動きの生成も行った。

本手法を利用して眼球運動をバーチャルキャラクタに付与することにより、VR空間上のユーザの位置と顔の部位を意識した上で眼球運動と頭部の動きを生成することが可能となった。提案手法を用いた実験では、ユーザの位置や身長に応じてVR空間上で自然な眼球運動と頭部の動きを付与することが可能であることが確認できた。また、実験により、顔の部位を遷移するような眼球運動は、ユーザに見つめられているような印象を与えるために有効な手段である事が判明した。

今後の展望としては、性格によって視線の運び方が異なる[3]ことが知られていることから、キャラクタの性格を視線パラメータを変更する事によって表現することが考えられる。また、本論文では視線遷移の際に考慮される対象の情報はユーザの顔の部位だけにしており、背景にある情報などを考慮していないため、今後の展望としてはユーザの背後や胴体などの別の部位の視覚的情報を考慮して適切にユーザから目を逸らす視線遷移モデルを構築することも考えられる。また、本論文では1対1で人が対面した場面しか考慮していないため、複数人と対面した時の眼球運動モデルを構築することも今後の展望として考えられる。さらに、注視の対象を顔の各部位の中心一箇所に限定しているため、今後の展望としては適切に注視位置を遷移させる事も、より人間の視線に近づけるためには考えられる。

また、本論文では瞬きや首の移動速度などを考慮していないため、よりリアルな印象をユーザに与えるような眼球運動を含んだ「目の動き」を生成するためには、それらのことを考慮に入れた上で眼球運動モデルを適用することも考えられる。

謝辞 本研究に際して、九州大学21世紀プログラムの卒業生の長谷川 聡氏に、多くの実験に協力していただきました。深く感謝します。

参考文献

- [1] Yarbus, A. L.: *Eye Movements and Vision*, Plenum Press, New York (1967).
- [2] Blais, C., Jack, R. E., Scheepers, C., Fiset, D. and Caldara, R.: Culture Shapes How We Look at Faces, *PLoS ONE*, Vol. 3, No. 8, p. e3022 (online), DOI: 10.1371/journal.pone.0003022 (2008).
- [3] Horley, K., Williams, L. M., Gonsalvez, C. and Gordon, E.: Social phobics do not see eye to eye: A visual scan-path study of emotional expression processing, *Journal of Anxiety Disorders*, Vol. 17, No. 1, pp. 33–44 (online), DOI: 10.1016/S0887-6185(02)00180-9 (2003).
- [4] Ruhland, K., Andrist, S., Badler, J., Peters, C., Badler, N., Gleicher, M., Mutlu, B. and McDonnell, R.: Look me in the eyes: A survey of eye and gaze animation for virtual agents and artificial systems, *Eurographics 2014 - State of the Art Reports*, pp. 69–91 (online), DOI:

- 10.2312/egst.20141036 (2014).
- [5] Kobayashi, H. and Kohshima, S.: Unique morphology of the human eye., *Nature*, Vol. 387, No. 6635, pp. 767–768 (online), DOI: 10.1038/42842 (1997).
- [6] Kendon, A.: Some functions of gaze-direction in social interaction., *Acta psychologica*, Vol. 26, No. 1, pp. 22–63 (online), DOI: 10.1016/0001-6918(67)90005-4 (1967).
- [7] Lee, S. P., Badler, J. B. and Badler, N. I.: Eyes Alive, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 21, No. 3, pp. 637–644 (online), DOI: 10.1145/566654.566629 (2002).
- [8] Deng, Z., Lewis, J. P. and Neumann, U.: Automated eye motion using texture synthesis, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 2, pp. 24–30 (online), DOI: 10.1109/MCG.2005.35 (2005).
- [9] Yeo, S. H., Lesmana, M., Neog, D. R. and Pai, D. K.: Eyecatch: Simulating Visuomotor Coordination for Object Interception, *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 31, No. 4 (2012).
- [10] Masuko, S. and Hoshino, J.: Head-eye Animation Corresponding to a Conversation for CG Characters, *Computer Graphics Forum*, Vol. 26, No. 3, pp. 303–312 (online), DOI: 10.1111/j.1467-8659.2007.01052.x (2007).
- [11] Le, B. H., Ma, X. and Deng, Z.: Live Speech Driven Head-and-Eye Motion Generators, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 11, pp. 1902–1914 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2012.74 (2012).
- [12] Itti, L., Dhavale, N. and Pighin, F.: Realistic Avatar Eye and Head Animation Using a Neurobiological Model of Visual Attention, *Proceedings of SPIE 48th Annual International Symposium on Optical Science and Technology*, San Diego, CA, (online), DOI: 10.1117/12.512618 (2003).
- [13] Stahl, J. S.: Amplitude of human head movements associated with horizontal saccades, *Experimental Brain Research*, Vol. 126, No. 1, pp. 41–54 (online), DOI: 10.1007/s002210050715 (1999).
- [14] Evinger, C., Manning, K. A., Pellegrini, J. J., Basso, M. A., Powers, A. S. and Sibony, P. A.: Not looking while leaping: the linkage of blinking and saccadic gaze shifts, *Experimental Brain Research*, Vol. 100, No. 2, pp. 337–344 (online), DOI: 10.1007/BF00227203 (1994).
- [15] Symons, L. A., Lee, K., Cedrone, C. C. and Nishimura, M.: What are you looking at? Acuity for triadic eye gaze., *The Journal of general psychology*, Vol. 131, No. 4, pp. 451–69 (2004).
- [16] R Core Team: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna (2017).
- [17] Spedicato, G. A.: *markovchain: Easy Handling of Discrete Time Markov Chains* (2017).
- [18] QGIS Development Team: *QGIS Geographic Information System*, Open Source Geospatial Foundation (2009).
- [19] Kano, F. and Tomonaga, M.: Face scanning in chimpanzees and humans: continuity and discontinuity, *Animal Behaviour*, Vol. 79, No. 1, pp. 227–235 (online), DOI: 10.1016/j.anbehav.2009.11.003 (2010).
- [20] Walkersmith, G. J., Gale, A. G. and Findlay, J. M.: Eye-Movement Strategies Involved in Face Perception, *Perception*, Vol. 6, No. 3, pp. 313–326 (online), DOI: 10.1068/p060313 (1977).