

複数人による双方向の対面行動を計量する頭部装着型デバイス

蜂須 拓^{†a)} 潘 雅冬[†] 松田壮一郎[†] バティスト ブロー[†]
鈴木 健嗣[†]

A Head-Mounted Device for Measuring Mutual Facing Behavior among Individuals

Taku HACHISU^{†a)}, Yadong PAN[†], Soichiro MATSUDA[†], Baptiste BOURREAU[†],
and Kenji SUZUKI[†]

あらまし 本論文では、複数人による双方向の対面行動を計量し、実時間で顕在化する頭部装着型デバイスの開発について述べる。まず、対面を二者の顔がそれぞれの頭部方向より ± 20 度以内に位置する状態と定義し、複数人間の相対的な頭部方向より対面行動を計量する頭部装着型デバイスの実装について述べる。本デバイスは頭部方向と光軸を一致させた赤外線通信モジュールを用いて他デバイスとの通信の確立状態により対面行動を計量する。また、発光による計量結果の実時間提示、Android 端末との連動による対面状態の開始時刻、継続時間、対面相手の記録が可能である。次に、我々は他者の顔を見ているときの被験者の眼球・頭部協調運動を解析し、定義した対面の妥当性を検証する。そして、実験室実験より開発したデバイスの性能を評価する。実験結果より、本デバイスの対面検知間は約 ± 20 度、応答時間は約330ミリ秒であることが確認された。また、本デバイスとビデオ観察者による対面行動計量を比較したところ統計的に高い一致が示された。

キーワード 赤外線通信, 対面行動, 装着型デバイス

1. ま え が き

対面行動は様々な社会的相互作用を誘発する頭部運動を伴う社会的行動である。他者と顔を合わせることで、相手の目、口元、頭の傾き等に注意を払えるようになり、アイコンタクト [1]、発話タイミングの調整、笑顔を見せ合うこと [2] 等が容易となる。特に、幼児は顔正面の方向（以後、頭部方向）に注意を向ける傾向があると報告されており [3]、対面行動は重要な社会的行動であるといえる。一方で、発達障害児は他者の顔を見ることを避ける傾向があり [4]~[6]、社会的相互作用をもつ機会を失っていると考えられる。

本研究では、対面行動の計量及び対面の促進を目的とする。対面行動の計量では、対面を物理的に定義し、開始時刻、継続時間の計測及び対面相手の同定を行う。対面の促進では、実時間でユーザに計量結果を提示することで対面行動に対して気づきを与える。前報 [7] では、我々は赤外線通信による物理的対面の計測、発

光による計量結果の実時間提示が可能な頭部装着型デバイスの開発について報告した。開発した軽量かつ着脱が簡単な装着型デバイスを用い、日常的活動を阻害しない計量、促進を試みている。一方で、対面の物理的な定義に関しては、我々の予備調査 [8] に基づくものであり、妥当性には議論の余地があった。また、二者間における対面行動を考えた際、お互いが顔を向い合せる状態の他にも、一方のみが他方に顔を向いている状態もありうる。しかし、本デバイスは対面のみを計測に留まっており、この双方向的な対面行動に関しては考慮されていない。これに対し、我々は本デバイスを改良することで、複数人による双方向の対面行動を計量する頭部装着型デバイス（図 1）を開発、評価し、その概要を報告した [9]。

本論文では、改良したデバイスの開発及び評価の詳細について報告する。また、顔を見ているときの眼球・頭部協調運動を計測し、モデル化することで我々が定義した対面の妥当性について論じる。複数人による双方向の対面行動の計量では、二名間の相対的な頭部方向に基づき、3 状態（両者が向き合っている；一方のみが他方に向いている；両者とも向き合っていない）を識別する。本論文では、まず先行研究を基に物理的

[†] 筑波大学、つくば市

University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8573 Japan

a) E-mail: hachisu@ai.iit.tsukuba.ac.jp

DOI:10.14923/transinfj.2017HAP0015



図 1 複数人による双方向の対面行動を計量する頭部装着型デバイス

Fig. 1 A head-mounted device for measuring mutual facing behavior among individuals.

な対面に関する定義及び計測手法について述べる。次に、実時間で対面行動を計量し、視覚的に顕在化する頭部装着型デバイスの開発について述べる。そして、他者の顔を見ているときの眼球・頭部協調運動を解析し、我々が定義した対面の妥当性を検証する。更に実験室実験により、開発したデバイスの対面検知閾、応答時間を計測し、ビデオ観察者による対面行動計量及び視線計測装置によるアイコンタクト計量と比較することでデバイス性能評価を行う。

2. 関連研究

本研究では、対面状態の変化に関わる行動（対面することや対面している状態からしていない状態にすること）を対面行動とする。眼球・頭部協調運動に関する研究分野では、視線方向は胴体を基準とし頭部方向と眼球方向の和として定義される（図 2 左）[10],[11]。したがって、対面行動の計量において胴体、眼球、視線方向は考慮しない。また、本研究ではアイコンタクトを二名の視線方向の先にお互いの目あるいはその周辺部位がある状態と定義し、対面と区別する。発達障害児研究において、アイコンタクトの頻度がしばしば言及されている[4],[5],[12],[13]。しかし、実際に計測されているものは観察者がカメラで撮影されたビデオ中の二名の顔と顔が向き合っていると判断した状態であり、本研究で定義した対面に近い。このようにアイコンタクトと対面の定義が曖昧であることがあるが、我々は、二つは異なる事象であり、対面行動においては異なる役割をもつと考える。

ここでは眼球・頭部協調運動の文献[11]を基に対面を「二者の顔がそれぞれの頭部方向より±20度以内に位置する状態」と定義する（図 2 中央）。視線が 30 度

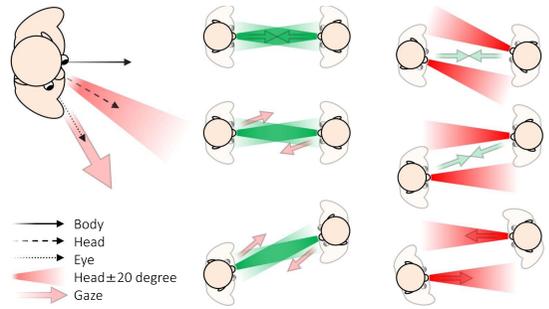


図 2 (左) 胴体方向、頭部方向、眼球方向及び視線方向、(中央) 対面及び (右) 非対面の例

Fig. 2 (left) Body, head, eye, and gaze orientation and illustration of (middle) face-to-face and (right) not face-to-face states.

以上変化する際、眼球運動及び頭部運動の両方が観察される[14],[15]。一方、小さな視線変位では頭部運動は観察されず、眼球運動のみ観察される。Fang らは、大型スクリーンでビデオ視聴時の眼球方向の分布範囲は頭部方向を中心に±20度であることを示した[11]。これらの研究では、人は頭部方向を中心に±20度の範囲にあるものには眼球運動のみで視線を動かして注意を払い、範囲外に注意を払おうとした際は頭部を動かすことを示唆している。一方で、注意を払う対象が顔である際に同様の傾向が観察されるかは不明である。4. では、人が他者の顔を見ているときの眼球・頭部協調運動を解析し、本定義の妥当性を検証する。

対面行動の計測手法として、固定カメラや環境に設置したセンサより身体姿勢を計測する方法（環境設置型）、装着型カメラや身体に固定したセンサを用いて身体姿勢を計測する方法（装着型）が挙げられる。環境設置型は対象者にカメラやセンサを固定する手間がかからない一方で、計測範囲に制限がある。また、本研究の目的である対面の促進を考えた際、新たに対象者へ計量結果を提示するためのデバイスが必要となる。装着型カメラを用いた手法では、撮影、画像処理によって対面を計測可能と考えられる。しかし、装着者が動きまわることによる映像のぶれ、カメラの焦点調節や解像度、照明の状態によって計測に時間がかかる、あるいは困難となることもある。深度センサ内蔵カメラを使用することで一部の問題を解決できると考えられるが、小型・軽量化が困難である。更に、カメラによる日常生活のビデオ撮影は意図しない人物の映り込み等、プライバシーの観点から実験環境に制限が課されることも考えられる。以上の観点から、本研究

ではカメラを用いない装着型センサによる対面行動の計量手法を採用した。装着型センサは対象者にセンサを固定するという手間が生じる一方で、環境設置型のように計測範囲に制限がなく、多様な場面での計測が容易である。

これまでに赤外線による無線通信技術を用いて複数人の胴体方向を計測する名札型デバイスが開発されている [16]。複数人間の相対的な胴体方向は社会的集団の形成や個人の社会的集団への参加を客観的に観察する指標になりうる [17]。一方で我々は社会的行動を観察する上で、頭部方向と胴体方向は独立の指標になると考えている。前章でも述べたとおり、顔を他者に向ける行動は自身の目や口等を見せることになり、他者と顔を合わせることはアイコンタクトや会話を促す。つまり、胴体方向は個人の集団への参加の意思を、頭部方向は特定他者との相互作用を行う意思を表すといえる。Watanabeらは相対的な頭部方向を用いた言語コミュニケーションを実現する頭部装着型赤外線通信デバイスを開発した [18]。本デバイスは装着者の音声を変換する。赤外線は指向性があり、装着者の頭部方向にのみ赤外線が照射され、対面時のみコミュニケーションが成立する。次章では、以上の研究を参考に我々が開発した赤外線通信により対面行動を計量し視覚的に顕在化する頭部装着型デバイスについて述べる。

3. 対面行動計量装着型デバイス

我々はデバイスを設計するにあたって前報告 [7], [19] の四つの設計要件：1) 簡易な着脱；2) 定量計測；3) 複数台での同時使用；4) 実時間計量，に加え次の設計要件を追加した。

デバイスが対面を検知した際、対面相手及び第三者が装着者の顔周辺に注意を向ける刺激を提示する。本論文では刺激として装着者の額周辺から可視光を提示する。これにより、対面中の二名はお互いの顔周辺に注意を払い、対面が持続されることを期待する。また、第三者に対して二名のデバイスから刺激を提示することで、自身も対面行動をとろうという動機づけをする。

3.1 原理

我々は先行研究 [16], [18] を参考に赤外線通信を採用した。まず、一方のデバイスが自身の ID を含むデータを変調し赤外線発光ダイオード (LED) より発信する。次に、デバイスは他のデバイスから発信される赤外線光を受信するために待機する。高指向性 LED を

用い、その光軸を赤外線受信モジュールの光軸と一致させると、図 3 (c) に示すように二つのデバイスが向かい合っている場合のみ半二重通信を確立する。逆に、一方のデバイスが他方に向いていない場合 (図 3 (b)) は単方向通信となり、両方が向き合っていない場合 (図 3 (a)) は通信を確立できない。額にデバイスを着用し光軸を頭部方向と一致させることで、通信の確立状態から対面状態の識別が可能である。また、デバイスは受信した ID より、対面相手を同定する。更に、デバイスは Bluetooth を介し Android 端末と連動して対面行動の開始時刻、継続時間、対面相手を端末ストレージに記録する。

3.2 実装

3.2.1 ハードウェア

開発した試作デバイスを図 4 に示す。本デバイスはヘッドバンド、制御モジュール、赤外線通信モジュール (図 5) から構成される。制御モジュールはマイクロコントローラ (NXP Semiconductors, LPC11U24)、

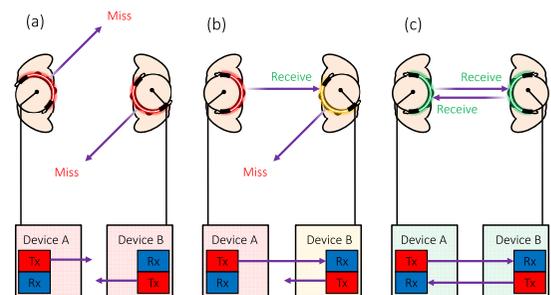


図 3 (a) 両者とも向き合っていない, (b) デバイス A (DA) のみデバイス B (DB) に向いている, (c) 両者とも向き合っている

Fig. 3 (a) Devices are not face-to-face, (b) only Device A (DA) faces to Device B (DB), and (c) the devices are face-to-face.

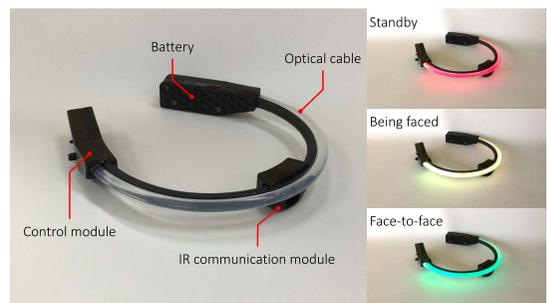


図 4 試作デバイス

Fig. 4 Prototype device.

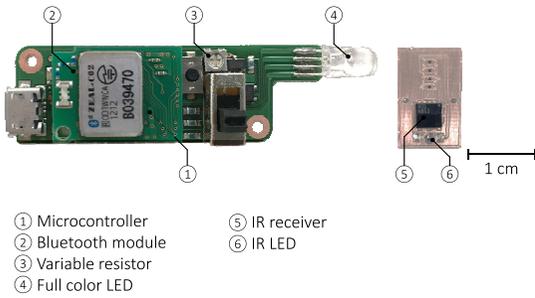


図 5 (左) 制御モジュール及び(右)赤外線通信モジュール
Fig. 5 (left) A control module and (right) an infrared communication module.

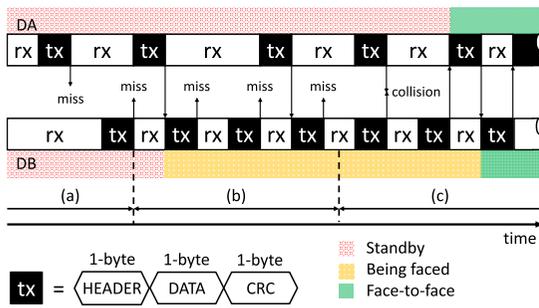


図 6 DA と DB の通信手続き
Fig. 6 Communication procedure between DA and DB.

Bluetooth モジュール (ADC Technology, ZEAL-C02), 1 kΩ 可変抵抗器及びフルカラー LED より構成される。フルカラー LED は光ファイバに接続されヘッドバンド全体を発光する。赤外線通信モジュールは赤外線受信モジュール及び赤外線 LED (Vishay, TSSP57038 及び TSML1020) より構成される。デバイスの総重量は約 75 g である。

マイクロコントローラは 38 kHz の搬送波によってオンオフ変調された Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) 信号を生成し、赤外線 LED を点滅させる。赤外線通信モジュールは他デバイスから赤外線光を受けると、UART 信号に復調する。通信速度は安定的に通信可能である 2.4 kbps に設定する。赤外線通信の範囲は赤外線 LED の放射強度と指向性及び赤外線受信モジュールの感度及び指向性に依存する。放射強度は可変抵抗器によって調整することができ、指向性はデバイスのきょう体によって調整する。

3.2.2 ソフトウェア

図 6 は図 3 のデバイス A (DA) とデバイス B (DB) 間の通信手続きの一例を示す。通信パケットはヘッダ

バイト、データバイト (デバイス ID)、巡回冗長検査 (CRC) バイトの計 3 バイトから構成する。本デバイスは通信の確立状態より SB (Standby), BF (Being face) 及び FtF (Face-to-face) 状態に移移する。

図中 (a) の段階において、デバイスは向かい合っていない。各デバイスは五つの時間間隔 (15, 30, 45, 60, 75 ミリ秒) からランダムに選択された間隔で同期要請ヘッダを含むパケットを送信する。パケット送信後から次のパケット送信時刻まで、各デバイスは他のデバイスからのパケットを受信するために待機する。本段階では両デバイスは SB 状態である。

図中 (b) の段階において、DA は DB の方を向いているが、DB は DA の方を向いていない。DB は DA から送信されたパケットを受信すると、直ちに応答確認ヘッダを含むパケットを送信する。しかし、DA はそのパケットを受信することはできない。この段階では、DB は BF 状態に移移する。

図中 (c) において、両デバイスは互いに向き合っている。初期段階では通信衝突 (赤外線の干渉) のため通信同期に失敗する。しかし、ランダムな時間間隔での送受信により、DA は DB から応答確認ヘッダを含むパケットを受信する。DA は FtF 状態に移移し、直ちにマスタヘッダを含むパケットを送信する。同様にパケットを受信した DB は FtF 状態に移移し、スレーブヘッダを含むパケットを送信する。その後、マスタデバイス (DA) が通信を先導する。両デバイスが再び向かい合わなくなると同期が断たれ、一定時間後 SB 状態に戻る。本デバイスは 100 sps で計測を行う。

3 状態間の短時間での変動を避けるために、本デバイスは窓幅 50 サンプルのソフトウェアフィルタを適用する。SB, BF, FtF 状態によってフルカラー LED を赤、黄、緑に発光するように定める (図 4)。

4. 眼球・頭部方向解析に基づく対面行動のモデル化

本章では、他者の顔を見ているときの被験者の眼球・頭部協調運動を解析し、我々が定義した対面の妥当性を検証する。

4.1 実験設備構成及び手続き

本実験では頭部方向を計測するためにモーションキャプチャ (OptiTrack, Flex 3: 以後, MC) を、眼球方向を計測するために視線計測装置 (Sensomotoric Instruments, Eye Tracking Glasses 2 wireless: 以後, GT) を用いた。計測対象となる被験者 (以後,

Sbj) の頭部 (帽子) に三つ、両肩に一つずつ再帰性反射マーカーを固定し、頭部方向のヨー角度 (Sbj の主観で頭部が胴体と一直線上で正面を向いた状態を 0 度、右方向を正とする) を解像度 1 度で計測した (図 7)。GT から Sbj の視線方向が含まれる一人称ビデオが得られる。ビデオの中心座標を頭部方向とし、視線方向から眼球方向のヨー角度を解像度 3 度で計測した (図 8)。MC 及び GT は 60 fps で計測し、出力される時刻を基に計測値を同期し記録した。本実験では簡単のため、ピッチ及びロール角は考慮しない。

本実験には 22-24 歳の日本人男性 4 名 (P1-P4) が参加した。図 9 に示すように、被験者は机周辺に固定した回転椅子に着席した。なお、椅子の回転に関しては制限しなかった。椅子 A 及び B に着席した被験者をそれぞれ Sbj 及び Trg とした。まず、実験者は Sbj にマーカーを固定し、GT を装着させ、MC 及び GT を校正した。次に、実験者は計測を開始し、被験者に 10 分間自由に会話させた後、計測を終了した。そして、被験者の位置を入れ替え、被験者全員が一度 Sbj とな

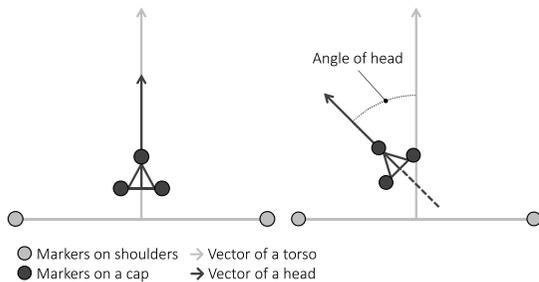


図 7 モーションキャプチャによる頭部方向計

Fig. 7 Measurement of head orientation with a motion capture.

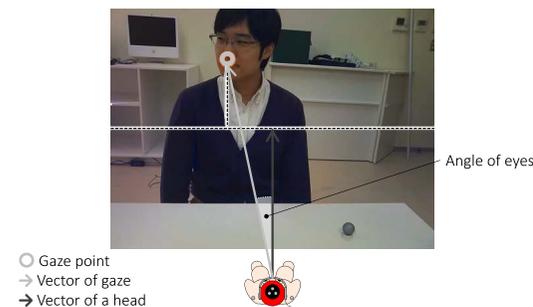


図 8 視線計測装置による眼球方向計測

Fig. 8 Measurement of eye orientation with a gaze tracker.

るまで同様の手順を繰り返した。本実験では自由会話を採用したが、会話内容によって行動が変容する可能性はある。しかし、我々の定義の裏付けをとるという目的に対しては十分であると考えた。

本実験で得られたデータは単位時間 (1/60 秒) ごとの Sbj の頭部及び眼球方向である。本解析ではまず Sbj が Trg の顔を見ていた (視線方向の先に Trg の顔領域があった) 時刻を抽出した。顔領域は、GT のビデオから Face API で検知された両眼の中心を中心とした半径 100 ピクセル (予備実験より決定) の円領域とした。実験中に Sbj が他の 2 名の顔を見ていた時間は短かったため以下の解析では考慮しない。

4.2 実験結果・考察

図 10 左に Sbj が Trg の顔を見ているときの頭部方向 (横軸) の相対度数分布 (縦軸) を示す。分布に対し次式を用いてガウシアンフィッティングを行った。

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(\mu - x)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

x は頭部方向、 A は最頻値、 μ は最頻値の頭部方向、 σ は標準偏差である。4 名の μ の平均値 (\pm 標準誤差) は $-4.0 (\pm 1.1)$ 度であり、正面方向より左方向であった。これは校正時のずれや、Sbj 若しくは Trg の初期位置や姿勢のずれ等が要因と考えられる。正規分布において、 x が μ から $\pm 3\sigma$ の範囲に含まれる確率は 99.73% である。4 名の 3σ の平均値 (\pm 標準誤差) は $16.0 (\pm 2.9)$ 度であった。本結果に余裕をもたせると、我々が定義した対面 (二者の顔がそれぞれの頭部方向より ± 20 度以内に位置する状態) は妥当であると考えられる。しかし、範囲に余裕をもたせることは計量の観点からいえば、偽陽性検知につながる。一方で、促進の観点から、例えば本来あと数度で対面になりうる状況に対して視覚提示することでき、対面に導

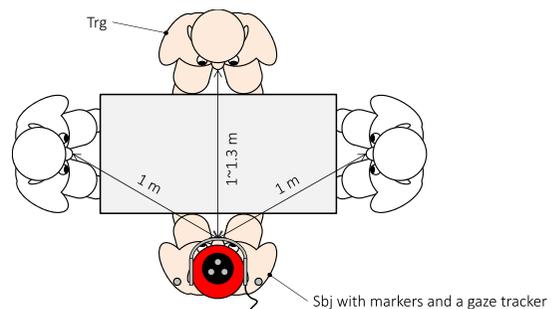


図 9 実験構成

Fig. 9 Experimental setup.

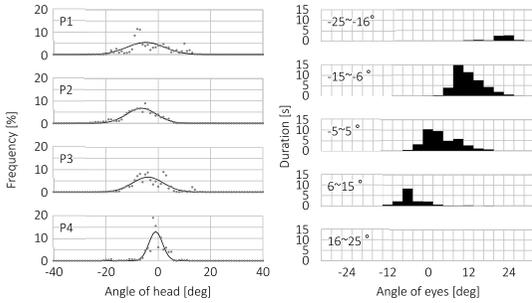


図 10 Sbj が Trg の顔を見ているときの (左) 頭部方向の相対度数分布及び (右) P1 の眼球方向の滞留時間分布

Fig. 10 Distribution of (left) head orientation and (right) P1's eyes orientation during Sbj's looking at Trg's face.

くことが期待できることから、本研究では以降も本定義を採用する。

頭部方向範囲 10 度ごとの眼球方向 (横軸) の滞留時間分布 (縦軸) の一例として P1 の結果を図 10 右に示す。いずれの被験者においても眼球方向の分布範囲が最大停留時間となった方向を中心に ± 20 度を越えることはなく、[11] と同様の傾向が観察された。

5. デバイス性能評価

本章では、開発したデバイスの性能を評価するために行った三つの実験室実験：1) 検知閾計測；2) 応答時間計測；3) ビデオ観察者及び視線計測装置との比較、について述べる。

5.1 検知閾計測

本実験では、デバイスが BF 及び FtF 状態となる範囲を明らかにすることを目的とする。

5.1.1 実験設備構成及び手続き

図 11 に示すように、本実験では普通紙上に設置した一対のデバイスを装着したダミーヘッドを用いた。紙面には 1.5 m の直線及びその上に 0.5 m 間隔で三つの分度器 (3 度刻み) を印刷した。一方のダミーヘッド (固定ヘッド) を図向かって右端直線上に左端に向けて固定した。他方のダミーヘッド (試験ヘッド) はいずれかの分度器の中心に置いた。まず、試験ヘッドを右端、すなわち固定ヘッドに向けた。次に、両デバイスは赤外線通信を開始し、試験ヘッドに装着したデバイス (試験デバイス) は Android 端末に計量結果を 60 秒間送信した。そして、実験者は試験ヘッドを右に 3 度回転させ、同様の計測を行った。この試行を

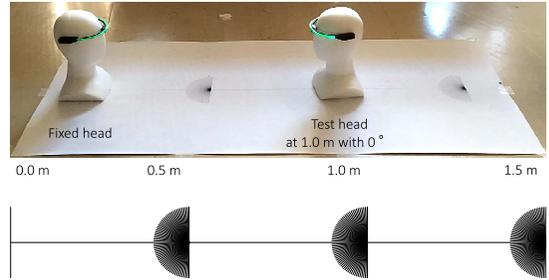


図 11 対面検知閾計測実験

Fig. 11 Evaluation of detection range.

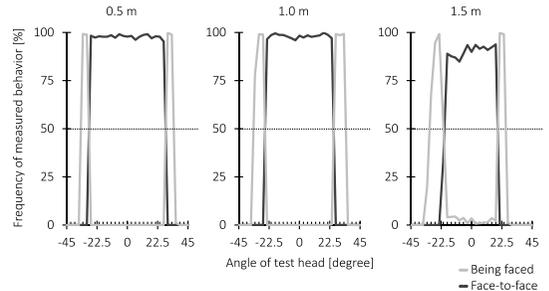


図 12 試験ヘッドの回転角度と BF 及び FtF 状態の頻度

Fig. 12 Angle of the test head vs frequency of two states (BF, FtF).

Android 端末が記録した計量結果が 3 試行連続で 60 秒間 SB 状態になるまで繰り返した。その後、反時計回り (負方向) に関しても同様の計測を行った。

以上の計測を三つの距離 (0.5, 1.0, 1.5 m) で行った。本距離は一般的な日常会話が行われる距離 (0.45 から 1.2 m) [20], [21] を基に決定した。本計測では赤外線 LED に流れる電流を 25 mA に固定した。

5.1.2 実験結果・考察

図 12 は試験ヘッドの頭部方向 (横軸) と試験デバイスが検知した BF と FtF 状態の相対度数分布 (縦軸) の関係を示す。試験ヘッドを 0 度より正あるいは負方向に回転させ、FtF 状態が 33.3% (チャンスレート) 以下になる直前の角度の絶対値の平均を FtF 検知閾と定義する。本評価では検知閾は 0.5, 1.0, 1.5 m それぞれで 27.0, 24.0, 18.0 度であった。本研究での対面の定義 (± 20 度) と比較すると、本デバイスは日常会話が行われる距離において数度ほど広範囲で対面が検知される。また、デバイス間の距離が大きくなると検知閾が小さくなり、検知閾内でも FtF 状態の継続時間が短くなることが明らかとなった。更に、デバイスの検知閾内において、0.5 及び 1.0 m 条件下では

FtF 状態の頻度は 95% を超えている一方で、1.5 m 条件下では 3-12% ほど減少した。これは赤外線 LED からの赤外線光が減衰するためと考えられる。

5.2 応答時間計測

本実験では、開発したデバイスの応答時間（デバイスの向きが物理的に BF 若しくは FtF 状態になってからデバイスが所望の状態に遷移するまでの時間 (T_{bf} 及び T_{ftf})）を計測することを目的とする。

5.2.1 実験設備構成及び手続き

本実験では前実験と同様の設備構成を用いた。 T_{bf} 及び T_{ftf} の計測において、試験ヘッドをいずれも 1.0 m、それぞれ 27 度及び 0 度の位置に固定した。まず、試験デバイスの赤外線通信の通信速度を 4 倍の 9.6 kbps に設定した。したがって、通信は確立されない (SB 状態)。次に、試験デバイスは制御モジュールのタクトスイッチが押されると、一つの I/O ピンを low から high 状態にすると同時に通信速度を 2.4 kbps に戻した。これにより仮想的に物理的な BF、FtF 状態を再現した。そして、デバイスは 3.2.2 で述べた通信手続きに基づき、BF 若しくは FtF 状態に遷移した。この際、デバイスは別の I/O ピンを low から high 状態にした。二つの I/O ピンの遅延を T_{bf} 及び T_{ftf} とし、オシロスコープを用いて計測した。それぞれ 50 試行ずつ計測を行った。

5.2.2 実験結果・考察

計測の結果、 T_{bf} 及び T_{ftf} の平均値 (\pm 標準誤差) はそれぞれ 351.75 (± 20.47) 及び 310.27 (± 13.79) ミリ秒であった。本結果より、本デバイスが計量可能な対面状態は平均で約 330 ミリ秒以上状態を継続した場合に限られることが明らかとなった。本論文では言及しないが、本デバイスの発光は対面行動に対する気づきを与えるきっかけとなり、また装着者にとって対面の動機となることを期待するものである。なお、会話中に首を振るとき等の頭部運動速度を考慮すると、本応答時間は十分に早いとはいえないが、対面を促進するという我々の目的においては十分であると考えている。

5.3 ビデオ観察者及び視線計測装置との比較

本実験では、試作デバイスによる対面行動計量、ビデオ観察者による対面行動計量及び装着型視線計測装置によるアイコンタクト計量を比較し、統計的一致度を求めること、及び試作デバイスによる計量の効率の良さを示すことを目的とする。また、対面行動とアイコンタクトが独立して生じる課題を選択した。これに

より、両者が異なる事象であること、及び対人行動において異なる役割を果たすかを観察する。

5.3.1 実験設備構成及び手続き

本実験には 23-35 歳の男女 3 名 (P1-P3) が参加した。デバイスを装着した被験者は 1.2 m 離れて着席した。実験中フルカラー LED は常に消灯していた。P1 と P2 は更に GT を装着した。被験者にババ抜きをするように指示した。本ゲームは他のプレイヤーの手もちのカードを引く動作が含まれ、我々はこの際に被験者が対面すると予想した。

まず、実験者はデバイスの位置と GT を較正した。次に、実験者は Android 端末を使用してデバイス及び GT の計測、及び 4 台の固定カメラの撮影を開始し、被験者はゲームを開始した。ゲーム終了後、実験者は計測を終了した。計測時間は約 4 分であった。

収集したデータは、三つのデバイスによる対面行動の計量結果、4 台の固定カメラより撮影されたビデオ、及び二つの GT のデータである。計量された FtF 状態の開始時刻、継続時間にはデバイス間でずれがある。これは赤外線通信の手続きと Android 端末上での Bluetooth 通信のバッファ処理に起因する数ミリから数百ミリ秒の間で不定に変化する遅延のためと考えられる。したがって、二つずつのデバイスの計量結果の論理和を計算した (DV)。固定カメラより撮影したビデオを基にビデオ観察歴 7 年の経験をもつ観察者に対面行動を計量させた (HC)。GT のデータを基に、P1 及び P2 の視線方向がお互いの顔領域に位置する状態をアイコンタクトとして開始時刻と継続時間を計測した。本実験では視線方向の解像度が低かったため、目周辺ではなく顔領域とした。以上より得られた三つの P1-P2 間のデータ (DV, HC, GT) を解析に用いた。

5.3.2 実験結果・考察

図 13 に時刻 (横軸) と計量結果 (縦軸: 0 は SB, BF 状態/非アイコンタクト状態, 1 は FtF 状態/アイコンタクト状態) を示す。全 4 分間、(a) カード配布時、(b) ゲーム時、の計 3 期間において、各計量結果の Cohen のカッパ係数を求めた (表 1)。

全 4 分間において、DV と HC はかなりの一致を示した一方で、両者ともに GT とは低い一致を示した。この理由として DV 及び HC は対面行動を計量したのに対し、CT はアイコンタクトを計量したことが挙げられる。本結果は対面とアイコンタクトは必ずしも同時に生起しないことを示唆する。期間 (a) において DV-HC 間のカッパ係数が低下した。これは P1 と P2

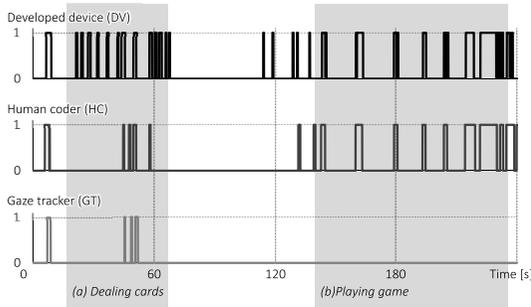


図 13 試作デバイス及びビデオ観察者による対面行動計量結果及び視線計測装置によるアイコンタクト計量結果

Fig. 13 Face-to-face behavior measured by our developed devices and a human video coder and eye contact measured by a gaze tracker.

表 1 ビデオ観察者及び視線計測装置との比較
Table 1 Comparison with a human coder and gaze trackers.

		HC	GT
DV	Total	0.634	0.067
	Period(a)	0.233	0.013
	Period(b)	0.817	0.001
HC	Total	-	0.050
	Period(a)	-	0.126
	Period(b)	-	0.097

の距離が比較的近くなり、本デバイスの FtF 検知閾が大きくなったためと考えられる。期間 (b) において DV と HC は高い一致を示した一方で、GT はアイコンタクトを全く検知しなかった。以上より、本デバイスは期間 (a) のように装着者同士の距離が比較的近い範囲 (1.2 m 程度) においてビデオ観察者とほぼ同様の精度で対面行動を計量可能であることが示唆された。また、実験終了後、被験者は実験者によって視線を観察されていることに気づいたため、不自然に振る舞ってしまった可能性があることを報告した。このことから、視線は心的な影響を受けやすいこと、また何かを隠そうとする際はアイコンタクトが生じにくいことが考えられる。更に、本実験ではババ抜きを採用したが、場面によってはアイコンタクトの頻度だけでなく対面行動にも変容が観られると予想される。したがって、文脈と行動変容の関係に関しては更なる検証が必要である。

ビデオ観察者が計量に要した時間は約 3 時間であった。計測時間が長くなったり、被験者の数が増えたりすると計量時間は一層長くなると予想される。これに対し、デバイスは実時間での計量が可能である。

6. むすび

本論文では、複数人による双方向の対面行動を計量して、実時間で顕在化する頭部装着型デバイスの開発について述べた。本デバイスは赤外線通信の確立状態より開始時刻、継続時間の計測及び対面相手を同定する。また、額周辺からの発光による対面行動を実時間で顕在化し、Android 端末と連動することで計量結果を記録する。また、我々は顔を見ているときの被験者の眼球・頭部協調運動を解析し、対面とは二者の顔がそれぞれの顔正面方向より ± 20 度以内に位置する状態である、とした我々の定義が妥当であることを示した。更に、実験室実験より開発したデバイスの性能評価について報告した。統制された限定的な環境であるが本実験結果より、本デバイスの対面検知閾は約 ± 20 度、応答時間は約 330 ミリ秒であることを確認した。また、カードゲーム中における対面行動を本デバイス及びビデオ観察者により計量、比較し、両者の間に高い統計的一致があることを確認した。

今後は本デバイスを使用した発達障害児への介入方法の確立を試みる。また、他の社会的相互作用を計量するデバイスと組み合わせ、より深い社会交流の計量を試みる。例えば、身体接触 [19] または笑顔 [22] を計量するデバイスと組み合わせることで、対面した状態での握手または笑顔の計量可能になることを期待できる。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「ソーシャル・イメージング：創造的活動促進と社会性形成支援」課題の支援により実施した。

文 献

- [1] R. Stiefelhagen and J. Zhu, "Head orientation and gaze direction in meetings," CHI'02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.858–859, Minnesota, USA, April 2002.
- [2] J.F. Cohn, L.I. Reed, T. Moriyama, J. Xiao, K. Schmidt, and Z. Ambadar, "Multimodal coordination of facial action, head rotation, and eye motion during spontaneous smiles," Proc. Sixth IEEE International Conference on IEEE Automatic Face and Gesture Recognition, 2004, pp.129–135, Seoul, South Korea, May 2004.
- [3] H. Yoshida and L.B. Smith, "What's in view for toddlers? using a head camera to study visual experience," Infancy, vol.13, no.3, pp.229–248, 2008.
- [4] S.E. Bryson, L. Zwaigenbaum, C. McDermott, V. Rombough, and J. Brian, "The autism observation

- scale for infants: scale development and reliability data,” *J. Autism and Developmental Disorders*, vol.38, no.4, pp.731–738, 2008.
- [5] R.J. Landa, A.L. Gross, E.A. Stuart, and A. Faherty, “Developmental trajectories in children with and without autism spectrum disorders: The first 3 years,” *Child Development*, vol.84, no.2, pp.429–442, 2013.
- [6] L.L. Speer, A.E. Cook, W.M. McMahon, and E. Clark, “Face processing in children with autism: Effects of stimulus contents and type,” *Autism*, vol.11, no.3, pp.265–277, 2007.
- [7] 蜂須 拓, 利根忠幸, 鈴木健嗣, “赤外線通信により物理的対面を計量するウェアラブルデバイス,” *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.22, no.1, pp.11–18, 2017.
- [8] Y. Pan, M. Hirokawa, and K. Suzuki, “Measuring k-degree facial interaction between robot and children with autism spectrum disorders,” *Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2015 24th IEEE International Symposium on, pp.48–53, Kobe, Japan, Aug. 2015.
- [9] 蜂須 拓, 潘 雅冬, 松田壮一郎, パティスト・ブロー, 鈴木健嗣, “対面行動を拡張するウェアラブルデバイス: 赤外線通信による物理的対面の計測,” *信学 HCG シンポジウム 2016*, pp.61–65, 2016.
- [10] D. Guitton and M. Volle, “Gaze control in humans: eye-head coordination during orienting movements to targets within and beyond the oculomotor range,” *J. Neurophysiology*, vol.58, no.3, pp.427–459, 1987.
- [11] Y. Fang, M. Emoto, R. Nakashima, K. Matsumiya, I. Kuriki, and S. Shioiri, “Eye-position distribution depending on head orientation when observing movies on ultrahigh-definition television,” *ITE Trans. Media Technology and Applications*, vol.3, no.2, pp.149–154, 2015.
- [12] L.K. Koegel, A.K. Singh, R.L. Koegel, J.R. Hollingsworth, and J. Bradshaw, “Assessing and improving early social engagement in infants,” *J. Positive Behavior Interventions*, vol.16, no.2, pp.69–80, 2014.
- [13] T.W. Vernon, R.L. Koegel, H. Dauterman, and K. Stolen, “An early social engagement intervention for young children with autism and their parents,” *J. Autism and Developmental Disorders*, vol.42, no.12, pp.2702–2717, 2012.
- [14] E.G. Freedman and D.L. Sparks, “Eye-head coordination during head-unrestrained gaze shifts in rhesus monkeys,” *J. Neurophysiology*, vol.77, no.5, pp.2328–2348, 1997.
- [15] J.S. Stahl, “Amplitude of human head movements associated with horizontal saccades,” *Experimental Brain Research*, vol.126, no.1, pp.41–54, 1999.
- [16] R. Otsuka, K. Yano, and N. Sato, “An organization topographic map for visualizing business hierarchical relationships,” *Visualization Symposium*, 2009. PacificVis’ 09. IEEE Pacific, pp.25–32, Beijing, China, April 2009.
- [17] A. Kendon, *Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters*, vol.7, CUP Archive, 1990.
- [18] J. Watanabe, H. Nii, Y. Hashimoto, and M. Inami, “Visual resonator: Interface for interactive cocktail party phenomenon,” *CHI’06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.1505–1510, Quebec, Canada, April 2006.
- [19] K. Suzuki, T. Hachisu, and K. Iida, “Enhancedtouch: A smart bracelet for enhancing human-human physical touch,” *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1282–1293, New York, USA, May 2016.
<http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858439>
- [20] E.T. Hall, *The hidden dimension*, Garden City, New York, Doubleday, 1966.
- [21] D. Lambert, *Body language 101: The ultimate guide to knowing when people are lying, how they are feeling, what they are thinking, and more*, Reed Business Information, New York, 2008.
- [22] A. Gruebler and K. Suzuki, “Design of a wearable device for reading positive expressions from facial emg signals,” *IEEE Trans. Affective Computing*, vol.5, no.3, pp.227–237, 2014.

(平成 29 年 5 月 1 日受付, 9 月 4 日再受付,
11 月 6 日早期公開)



蜂須 拓

2010 年電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科卒業。2012 年電気通信大学大学院総合情報学専攻博士前期課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2015 年同大学大学院情報理工学研究科総合情報学先行博士後期課程修了。同年より筑波大学システム情報系研究員, 現在に至る。触覚 VR/AR, マルチモーダルヒューマンインタフェース, ウェアラブルデバイスの研究に従事。博士 (工学)。



潘 雅冬

He obtained his BEng degree at School of Computer Science and Technologies, Harbin Institute of Technology, China, and his MEng degree at Department of Intelligent Interaction Technologies, University of Tsukuba, Japan. He received Doctor of Human Informatics at Ph.D Program in Empowerment Informatics, School of Integrative and Global Majors, University of Tsukuba, Japan. He is now a researcher at NEC Central Research Laboratories, Japan. His researches focus on theory of Human-Robot Interaction under social context, and Human Behavior Modeling such as Face-to-Face Interaction.



松田壮一郎

2010年慶應義塾大学文学部心理学専攻卒業。2012年慶應義塾大学大学院社会学研究科心理学専攻修士課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員（DC1）。2015年同大学大学院社会学研究科心理学専攻博士課程単位取得退学。同年より日本学術振興会特別研究員（PD）、及び筑波大学システム情報系特別研究員、現在に至る。応用行動分析、アイトラッキング、感情認知の研究に従事。博士（心理学）。



バティスト ブロー

He received his engineer diploma of information technology for healthcare from Polytech Grenoble, France in 2015. He is currently a research assistant in the Faculty of Engineering, Information and Systems at the University of Tsukuba.



鈴木 健嗣（正員）

2003年早稲田大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻修了。早稲田大学助手、筑波大学講師、准教授を経て、2016年筑波大学システム情報系教授、現在に至る。人工知能、ウェアラブルデバイス、人支援ロボティクスに関する研究に従事。博士（工学）。