

コミュニケーションにおける引き込み現象の 生理的側面からの分析評価

渡 辺 富 夫[†] 大久保 雅史[†]

コミュニケーションにおける引き込み現象のように関係が成立するノンバーバルなインタラクションは、異文化、異民族間のコミュニケーションにおいても通用する共通語ともいえ、人間生物学的にみて、より普遍的であり、本質的重要性を持っていると考えられる。本論文では、従来主観的行動観察による定性的研究の色彩が強いこの分野に、呼吸・心拍間隔変動を用いた生体情報計測手法を導入し、新たにコミュニケーションの定量評価手法を提案している。本手法を用いて、成人の対面・非対面コミュニケーションおよび原初的コミュニケーションとしての母子間インタラクションにおける生理的側面での引き込み現象を呼吸を中心に分析評価し、呼吸の引き込みが身体的コミュニケーション場の創出に重要な役割を果たしていることを示している。自己のリズムを変化させ、互いに引き込み化を図ることによって、関係が成立し、より深いコミュニケーションが可能になる。テレビ会議等で円滑なインタラクションを実現するには、この呼吸の引き込み化を図ることが大切で、呼吸の引き込みの評価がシステムの設計・評価に応用できる。本研究の成果は、身体的コミュニケーションにおける引き込み原理の解明とそれに基づくヒューマンインタフェース開発の基盤になるものである。

Physiological Analysis of Entrainment in Communication

TOMIO WATANABE[†] and MASASHI OKUBO[†]

The Entrainment which forms the biological relation between talkers plays an important role in the smooth exchange of information. In this paper, the physiological entrainment of respiration between talkers is evaluated on the basis of burst-pause of speech, respiration and heart rate variability as indices from the viewpoint that the respiratory entrainment would be a physiological main factor to make communication smooth in face-to-face interaction. By using the proposed physiological measurements of communication, the experiment is performed in adult face-to-face versus non-face-to-face communication and mother-infant interaction as a primitive form of communication. The existence of respiratory entrainment in face-to-face interaction is demonstrated by the cross-correlation analysis of the indices. This finding suggests the entrainment is biologically essential to human communication and it could be applied to human interface for the design and evaluation of face-to-face interaction support systems such as a teleconference system.

1. はじめに

対面したコミュニケーションと電話では、伝わる情報の円滑さも理解の度合いも異なる。これは、対面においては単に言葉によるバーバル情報だけでなく、身振り・手振りや表情あるいは息づかいといった言葉によらないノンバーバル情報が相互に同期し、対話者相互に関係を成立させ、身体的コミュニケーション場の創出を容易にしているからであると推察される。この生体リズムが相互に時系列的に関係が成立して同期する現象を引き込み現象と呼ぶ¹⁾。乳児は言葉を話す

ようになる以前にこの引き込み現象を反復実行している^{2),3)}。これは、言語獲得の基盤を与えていると推察され、乳児の月数とともに四肢の反応から表情反応へと、より高次の反応系へと推移し、うなずき・表情反応の引き込み現象の形で現れる、人間にとって本質的なコミュニケーション形態であると考えられる⁴⁾。したがって、このメカニズムがコミュニケーションシステムに導入されるならば、まさに人間に適合したヒューマンインタフェースが実現できるものと期待される。

著者らは、母親の語りかけに対する乳児の四肢の動きの引き込み現象ならびに成人間の音声とうなずき・まばたき反応の引き込み現象を分析評価し、システム論的にモデル化して、音声入力に対する視覚情報フィードバックシステムを開発し、その有効性を示し

[†] 岡山県立大学情報工学部
Faculty of Computer Science and System Engineering,
Okayama Prefectural University

てきた^{5)~8)}。さらに音声とうなずき・表情といった視聴覚情報の引き込み現象だけでなく、対話者相互の生理的・情動的側面での引き込み現象に着目し、リラックス状態・集中状態など自律神経活動を反映する心拍間隔変動に基づいて引き込み現象を分析した結果、円滑なインタラクションでは情動まで含めた生理的側面での引き込み現象が生じていることを示唆する事例を得た⁹⁾。

発話時の音声の ON-OFF (バースト・ポーズ) の区切りは呼気段落区分と呼ばれ、呼吸と密接な関係がある。また呼吸と心拍間隔変動とは、交感・副交感の両神経活動の関与を受け、心拍間隔が呼気には長く、吸気には短くなることが知られている¹⁰⁾。これら音声の ON-OFF と呼吸の関係および呼吸と心拍間隔変動の関係が対話時の心拍間隔変動の引き込み現象の生起に起因していると推定される。武道、カウンセリングにおいても、呼吸、間合いが重要視されており、間合いも呼吸をはかることに関係していることから、呼吸の引き込みが重要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら、これまでに音声の ON-OFF、呼吸、心拍間隔変動の関係は、コミュニケーションにおける呼吸の引き込みの観点からは分析されていない。

本論文では、従来主観的行動観察による定性的研究の色彩が強いこの分野に、呼吸・心拍間隔変動を用いた生体情報計測手法を導入し、呼吸の引き込みに着目した新たなコミュニケーション定量評価手法を提案している。本手法を用いて、成人の対面・非対面コミュニケーションおよび原初的コミュニケーションとしての母子間インタラクションにおける生理的側面での引き込み現象を呼吸を中心に分析評価し、呼吸の引き込みが身体的コミュニケーション場の創出に重要な役割を果たしていることを示している。

本研究では、成人間のコミュニケーションだけでなく、情動変動が直接的に生理指標に反映されやすい乳児と母親とのインタラクションも研究対象に選定している。成人間では対面と非対面での繰返し過程のコミュニケーションを、母子間では母親と乳児との交わりで典型的な寝かしつける過程でのインタラクションと、リズム音によるストレス負荷にともなう母子の情動変動を生理的側面での引き込みの観点から分析評価している。これは、コミュニケーションにおける生理的側面での引き込み現象が、成人間だけでなく、発達初期コミュニケーションにおいても存在することを示すことで、引き込み現象が人間生物学的にみて本質的重要性を持っていると推定できるからである。

2. 対面コミュニケーションにおける引き込み現象の分析評価

ここでは、対面・非対面での話し手の音声の ON-OFF、呼吸と聞き手の呼吸との引き込み現象を分析評価し、コミュニケーションにおける呼吸の引き込みの重要性が示されている。

2.1 実験方法

実験概略図を図 1 に示す。対話者はあらかじめ話し手と聞き手が設定され、一方から他方への話の伝達を対象とした。実験は、1対1でテーブルを囲んでまず対面で3分間、次に対話者の視界を衝立で遮った非対面で3分間を2セット繰り返して行い、マルチテレメータシステム(日本光電 WEB-5000)を用いて対話者相互の心電図波形、胸部呼吸ピックアップによる呼吸波形(歪計のついたベルトを肋骨の下方(第6-第7)の肋間付近に巻き、呼吸にともなう胸部の伸縮を検出した波形)を音声波形とともに DAT データレコーダ (TEAC RD-130E) に同時記録し、話し手の音声の ON-OFF、呼吸、心拍間隔および聞き手の呼吸、心拍間隔を同時計測した。また同時に対話者の各々の表情を2台のカメラでビデオ編集システム (SONY FXE-100) を用いて画面を2分割して収録した。話し手は学部4年男子学生6人で、聞き手は学部3年男子学生1人である。話は就職活動など聞き手が興味を持つと予想される内容を選定した。

2.2 分析方法

DAT データレコーダに記録した音声、呼吸、心電図の各波形を 8chA/D コンバータ (SDS Dasbox) で 1,000 Hz、12 ビットで同時サンプリングし、ワークステーション (SUN SPA RC station 20) に格納した。音声については、30 ms (データ数 30) の平均雑音レベルに 12 dB を加えた値を ON と OFF の臨界値とし

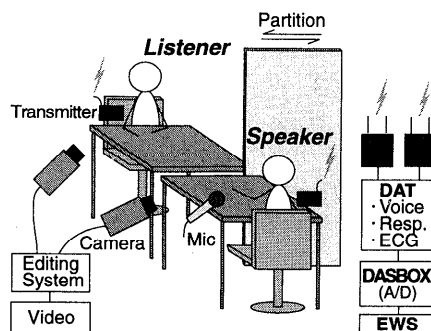


図 1 実験概略図

Fig. 1 Set up for the experiment.

て2値化した。しかし無声子音の前の短いOFF 区間等は発声器官のメカニズム上生じる区間で、呼吸段落区分としてはON 区間と見なす方が適切なので、10ms ごとに120ms のフィルイン（120ms 以下のOFF をON に置換する操作）を施し、音声のON-OFF のデータとした¹¹⁾。心拍間隔については、1ms の精度で心電図波形のR 波のピークを検出し、その間隔であるR-R 間隔を計測した¹²⁾。その心拍間隔の時系列をスプライン補間して10ms ごとに心拍間隔データを算出した。呼吸については、呼吸による胸郭の伸縮に対応して呼気では減少し、吸気では増大する波形を1ms の精度で収集した。そのデータを心拍間隔データの時間間隔に合わせるために平滑化して10ms ごとに呼吸データとした。これら時系列のデータ間の関係については、以下の相互相関関数 $C(\tau)$ で評価した。

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

話し手内 $x(i)$: 音声の ON-OFF, 心拍間隔
 $y(i)$: 呼吸
 対話時 $x(i)$: 話し手
 $y(i)$: 聞き手

μ_x, μ_y : x, y の平均値
 n : データ数
 τ : 時間遅れ

分析対象時間は120秒間（データ数 $n = 12,000$ ）、10ms のずれ時間で最大5秒に設定した。

2.3 分析結果

対話前の話し手の呼吸と心拍間隔との関係の一例を図2に示す。心拍間隔に対する呼吸のずれ時間が0.5秒で顕著な負の相関がみられる。これは、呼気には心拍間隔が長くなるのに対して呼吸胸郭は小さくなり、吸気にはその逆になることから当然の結果といえる。その話し手自身の対面での音声のON-OFF, 呼吸, 心

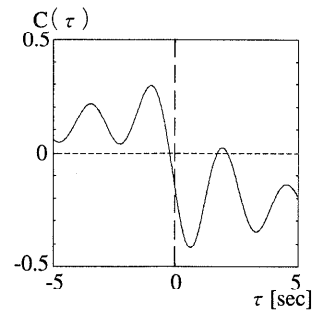


図2 対話前の話し手の心拍間隔に対する呼吸の相互相関関数 $C(\tau)$
 Fig.2 Cross-correlation $C(\tau)$ of respiration to heart beat-to-beat interval (RRI) of a speaker before speech.

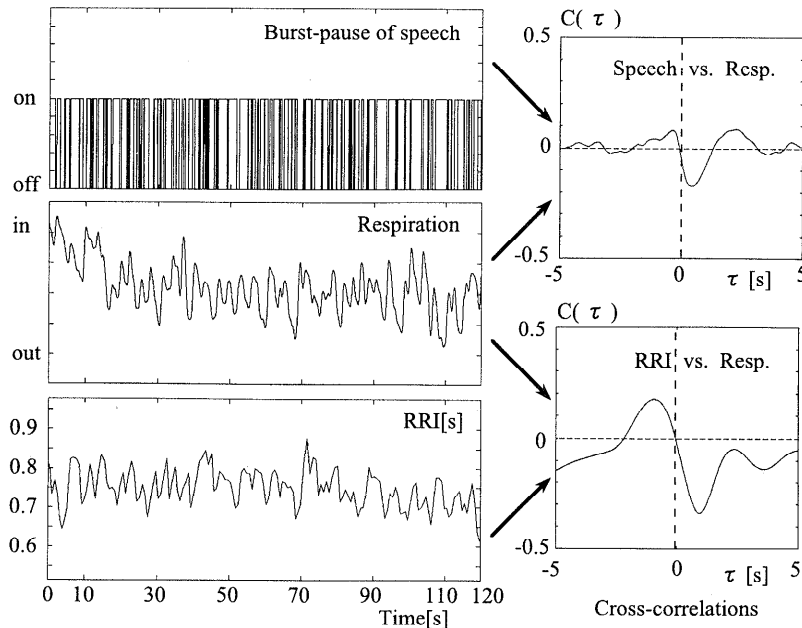


図3 話し手自身の対面での音声のON-OFF (Speech), 呼吸 (Resp.), 心拍間隔 (RRI) の関係
 Fig.3 Relations of respiration to burst-pause of speech and RRI of the speaker himself.

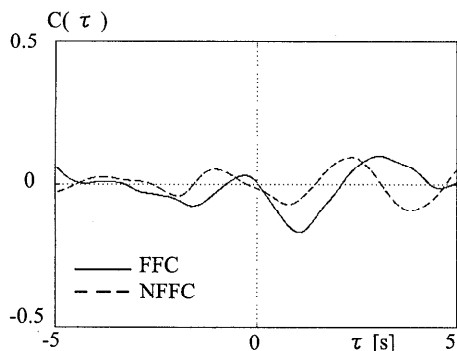


図4 対面 (FFC) および非対面 (NFFC) での話し手の音声の ON-OFF に対する聞き手の呼吸の相互相関関数
 Fig. 4 Cross-correlations between the same speaker's burst-pause of speech in Fig. 3 and a listener's respiration in face-to-face communication (FFC) and non-face-to-face communication (NFFC).

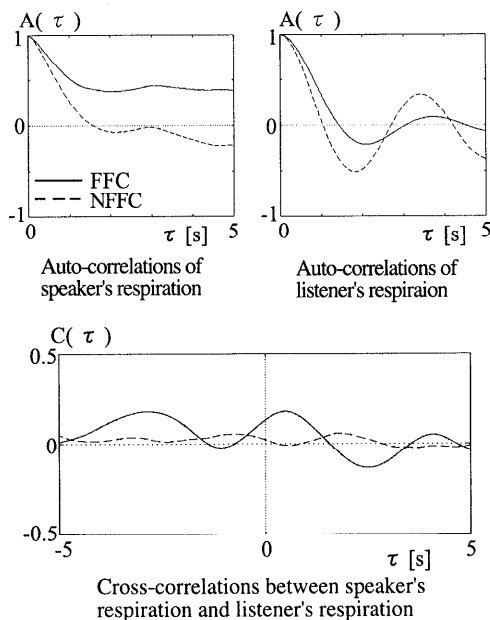


図5 図4の対面 (FFC) および非対面 (NFFC) での話し手と聞き手の呼吸の自己相関関数 $A(\tau)$ と相互相関関数
 Fig. 5 Evaluation of respiratory entrainment between the same speaker and listener in Fig. 4.

拍間隔の関係を図3に示す。話し手の呼吸と心拍間隔の相互相関関数は、対話前ほどには顕著な相関はみられない。音声の ON-OFF に対する呼吸のずれ時間が0.3秒で負の相関がみられることから、対話が開始されて話し手自身の音声の ON-OFF と呼吸の関係が成立することで、呼吸と心拍間隔との関係を弱めたと解釈される。

対面および非対面での話し手の音声の ON-OFF に

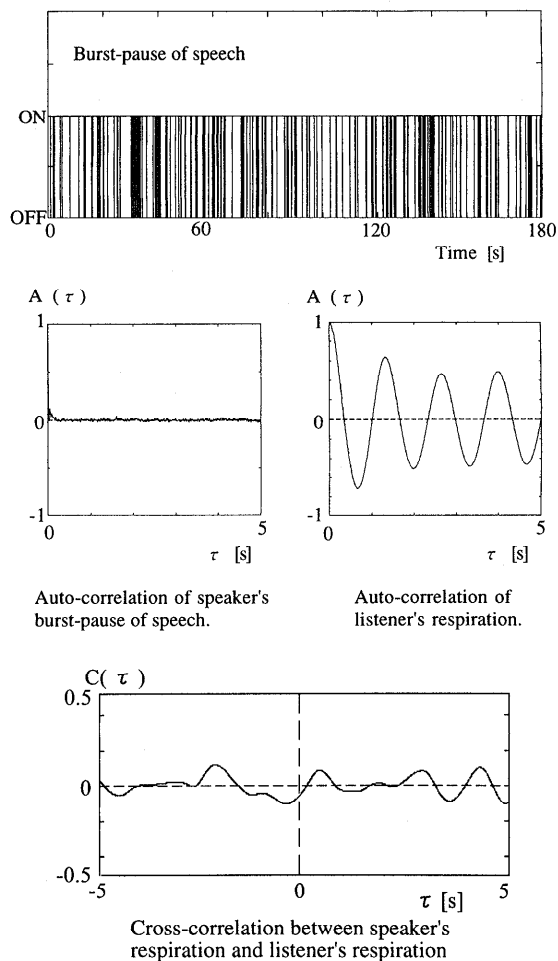


図6 話し手の音声の ON-OFF がランダムな場合
 Fig. 6 An example of random pattern of burst-pause of speech in face-to-face interaction.

対する聞き手の呼吸との相互相関関数を図4に示す。対面では非対面に比べて顕著に時間遅れが1秒で負の相関がみられる。また対面および非対面での同じ話し手と聞き手との呼吸の相互相関関数および各々の自己相関関数を図5に示す。対面では話し手に対する聞き手の呼吸のずれ時間が0.5秒で正の相関を示し、話し手と聞き手との呼吸の引き込み現象が生じている。また非対面では対面よりも聞き手の自己相関関数が大きく、聞き手がより自己固有のリズムで呼吸しているのが分かる。これらと同じ傾向が話し手6人中3人にみられた。また図6に示すように話し手の音声の ON-OFF がランダムな場合には、話し手と聞き手とで呼吸の相関はみられず、対面でも聞き手の自己相関関数が大きかった。これらの結果は、非対面のように、あるいは対面でも対話者相互のインタラクションがと

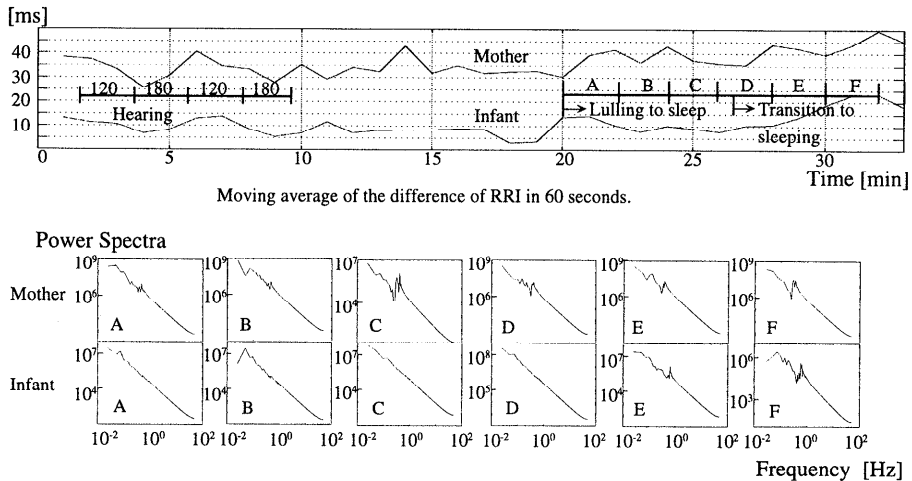


図7 母子間インタラクションにおける心拍間隔変動の時系列変化と睡眠移行過程での心拍間隔のパワースペクトルの推移 (A-F は、寝かしつけの開始から2分ごとの分析区間)

Fig. 7 Power Spectra change in 2 minutes analyzing periods whose starting times of analysis (A-F) are incrementally shifted by 2 minutes from the infant's alert state to the sleeping state in mother-infant interaction.

りにくい場合には呼吸が自己固有のリズムに陥りやすく、対面のようにインタラクションがとれている場合には呼吸が互いのリズムに引き込まれることを示すものである。

3. 原初的コミュニケーションとしての母子間インタラクションの分析評価

ここでは、生体リズムが相互に同期化して関係を形成する母子間での引き込み現象について、自律神経活動を反映する心拍間隔変動の生理指標に基づき分析評価されている。呼吸そのものの計測については、インタラクション中の乳児の呼吸計測が困難なために、乳児の睡眠移行過程での心拍間隔のパワースペクトル解析により、呼吸成分の評価が行われている。

3.1 実験方法

心拍間隔計測には、同じくマルチテレメータシステムを用いて、心電図波形をDATデータレコーダに記録した後、ワークステーションに接続された8ch A/Dコンバータで1000 Hz、12ビットでサンプリングした後、ワークステーション上で心電図波形のR波のピークを検出し、その間隔であるR-R間隔(心拍間隔)を計測した。実験対象としては、情動が直接的に反映されやすい乳児(3カ月児から5カ月児)と母親の20組を選定した。母子ともに横になってもらい、MIDI音源によるテンポが120と180のアマリリスのピアノ曲を各2分間、交互に2セットの約8分間聴かせた後、母親に乳児を寝かせつけてもらった。そのときの両者

の心拍間隔を同時計測し、心拍間隔変動(連続する心拍間隔の差の60秒間にわたる平均値)の時系列変化と、心拍間隔をパワースペクトル解析することで、両者の関係を評価した。また同時に実験の様子をビデオテープに収録した。実験時間は約40分間である。

3.2 分析結果

乳児が覚醒状態から睡眠状態に移行する過程での母親と乳児との心拍間隔変動の時系列変化とその2分ごとの心拍間隔のパワースペクトルの推移の一例を図7に示す。図中、20分からの母親の寝かしつけの開始より、まず母親の心拍間隔変動が大きくなり、26分付近からの乳児が睡眠状態に移行するにつれて、心拍間隔変動が母子ともに同調して大きくなっている。また寝かしつけの開始からのパワースペクトルの推移(A~F)においても、まず母親がCで副交感神経活動の指標となる周波帯(0.15~0.4 Hz)にピークを示す呼吸成分が顕著に、Eからは母子ともに呼吸成分が現れ¹³⁾、副交感神経系支配への移行過程の情動面での引き込み現象がみられる。とくに母親の方が先に呼吸成分が現れており、自分が寝る態勢に入ってから乳児に対して引き込みを起こさせているのが分かる。このような現象は、寝かしつけることのできた11組の母子のうち7組にみられた。

また、テンポ聞取り実験における母子間インタラクションについては、心拍間隔変動が情動ストレス下では小さく、リラックス時には大きくなることに着目し、テンポの違いによる心拍間隔変動の変化を乳児とその

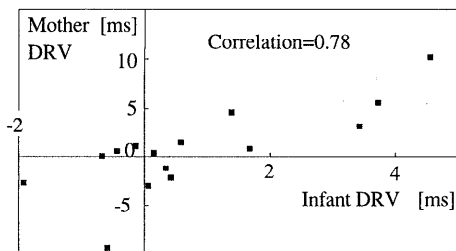


図8 母子15組での1回目のテンポ180と2回目のテンポ120の心拍間隔変動の差の関係

Fig. 8 Relation of the difference of RRI variability between the first tempo 180 and the second 120 (DRV) in 15 pairs of mothers and their infants.

母親を対にして分析可能な母子15組について分析した。1回目のテンポ180と2回目のテンポ120との心拍変動の差の関係を図8に示す。相関係数は0.78であり、情動変動の同調がみられる。また同様に、1回目のテンポ120とテンポ180との相関係数は0.34で、2回目のテンポ120とテンポ180では0.50で、いずれも正の相関関係が示された。

4. おわりに

対面・非対面での身体的コミュニケーションにおける引き込み現象を呼吸・心拍間隔変動等の生理的側面から分析評価し、呼吸の引き込み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を示した。さらに、乳児の睡眠移行過程において、母子ともに心拍間隔変動の周期性（呼吸成分）が計測され、情動面での引き込み現象の存在が確認された。またテンポ聞き取り実験における母子間インタラクションにおいても、情動変動の同調がみられた。これらの結果は、円滑なコミュニケーションが図られるには、こういった情動まで含めた生理的側面での引き込みが生じていることを示すものである。このように、従来、主観的行動観察による定性的研究の色彩が強いこの分野に、生体情報計測手法を導入し、新たにコミュニケーションの定量評価手法を確立した。

「息が合う」とか「呼吸が合う」という言葉が互いの調子がぴったり合うときに用いられるように、円滑にコミュニケーションしているときには呼吸の引き込みが生じているといえる。非対面では対面よりも聞き手がより自己固有のリズムで呼吸していることから明らかのように、対面することで自己のリズムを変化させ、互いに引き込み化を図ることによって、両者の間に関係が成立し、より深いコミュニケーションが可能になる。まさに生体リズムの引き込みがコミュニ

ケーション場の創出に重要な役割を果たしているといえる。テレビ会議等で円滑なインタラクションを実現するには、この呼吸の引き込み化を図ることが大切で、呼吸の引き込みの評価がシステムの設計・評価に応用できる。

引き込み現象のように関係が成立するノンバーバルなインタラクションは、異文化、異民族間のコミュニケーションにおいても通用する共通語ともいえ、人間生物学的に本質的なコミュニケーションであると考えられる。このインタラクションを成立させる基本原理の解明、すなわち関係を成立させる場の創出原理の解明が次世代ヒューマンインタフェースの課題であり、本研究の成果は、身体的コミュニケーションにおける引き込み原理の解明とそれに基づくヒューマンインタフェース開発の基盤になるものである。

謝辞 本研究の一部は、科学技術庁振興調整費総合研究「人間の社会的諸活動の解明・支援に関する基礎的研究」、文部省科学研究費および島津科学技術振興財団の補助による。

参考文献

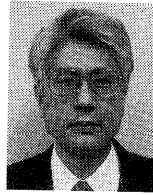
- 1) 清水 博：生命と場所，pp.13-78 (1992)。
- 2) Condon, W.S. and Sander, L.W.: Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech, *Science*, Vol.183, pp.99-101 (1974)。
- 3) Kobayashi, N., Ishii, T. and Watanabe, T.: Quantitative Evaluation of Infant Behavior and Mother-Infant Interaction; An Overview of a Japanese Interdisciplinary Programme of Research, *Early Development and Parenting*, Vol.1, No.1, pp.23-31 (1992)。
- 4) 渡辺富夫：音声対話システムにおけるヒューマン・インタフェース（引き込みを中心として）、情報処理学会研究報告，96-HI-65, pp.27-32 (1996)。
- 5) Watanabe, T. and Yuuki, N.: A Voice Reaction System with a Visualized Response Equivalent to Nodding, *Advances in Human Factors/Ergonomics*, Vol.12A, pp.396-403 (1989)。
- 6) Watanabe, T. and Higuchi, A.: Facial Expression Graphics Feedback for Improving the Smoothness of Human Speech Input to Computers, *Advances in Human Factors/Ergonomics*, Vol.18A, pp.491-497 (1991)。
- 7) Watanabe, T.: Voice-Responsive Eye-Blinking Feedback for Improved Human-to-Machine Speech Input, *Advances in Human Factors/Ergonomics*, Vol.19B, pp.1091-1096 (1993)。
- 8) Watanabe, T.: Effects of Pitch Adaptation in Prosody on Human-Machine Verbal Communication, *Advances in Human Factors/*

Ergonomics, Vol.20A, pp.269-274 (1995).

- 9) Watanabe, T., Okubo, M. and Kuroda, T.: Analysis of Entrainment in Face-to-Face Interaction Using Heart Rate Variability, *Proc.IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.141-145 (1996).
- 10) 大須賀美枝子, 寺下裕美, 下野太海: 心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈, *BME*, Vol.11, No.1, pp.75-85 (1997).
- 11) Watanabe, T.: The Adaptation of Machine Conversational Speed to Speaker Utterance Speed in Human-Machine Communication, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-20, No.2, pp.502-507 (1990).
- 12) 廣瀬通孝, 石井威望: 知的作業の客観的評価の方法, *日本機械学会論文集*, Vol.51, No.471, pp.3153-3158 (1985).
- 13) 八名和夫: スペクトル・相関解析と新しい応用, *BME*, Vol.11, No.1, pp.34-37 (1997).

(平成 9 年 7 月 3 日受付)

(平成 10 年 1 月 16 日採録)



渡辺 富夫 (正会員)

1955 年生. 1978 年岡山大学工学部生産機械工学科卒業. 1983 年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻博士課程修了 (工学博士). 同年山形大学工学部情報工学科助手, 1984 年同専任講師, 1989 年同助教授. 1993 年岡山県立大学情報工学部情報システム工学科教授. 1992~1993 年米国ブラウン大学客員研究員. ノンバーバルインタフェース, ヒューマンインタラクションの研究に従事. 日本機械学会設計工学・システム部門運営委員, 同技術委員会 (ヒューマンインタフェース) 主査, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会運営委員. 1994 年岡山工学振興会科学技術賞, 1997 年日本機械学会設計工学・システム部門アイデア賞受賞. IEEE 会員.



大久保雅史 (正会員)

1961 年生. 1985 年大阪大学工学部溶接工学科卒業. 1990 年同大学大学院工学研究科溶接工学専攻後期課程単位取得退学. 博士 (工学). 1991 年同溶接工学研究所助手. 1995 年岡山県立大学情報工学部専任講師, 1997 年同助教授. 1993~1994 年米国カリフォルニア州立大学バークレー校客員研究員. 機械システムの知能化, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 日本機械学会設計工学・システム部門技術委員会 (「ヒューマンインタフェース」, 「コンカレントエンジニアリング, CSCW」) 幹事. 1993 年高温学会技術奨励賞, 1996 年情報処理学会全国大会大会優秀賞, 1997 年日本機械学会設計工学・システム部門アイデア賞. 人工知能学会, 電子情報通信学会, システム制御情報学会各会員.