

心を1つに： マルチエージェント型アバターの構築とその応用

Be one mind : Construction and application of multi-agent avatar

竹田泰隆¹ 吉田広平¹ P.Ravindra S. De Silva¹ 岡田 美智男¹

Yasutaka Takeda¹, Kohei Yoshida¹, P. Ravindra S. De Silva¹, and Michio Okada¹

¹豊橋技術科学大学 情報・知能工学系

¹Department of Computer Science and Engineering,
Toyohashi University of Technology.

Abstract: Many of living being utilizes behaviors with dexterity that have been achieved by cooperation between the elements in the musculoskeletal system with many degrees of freedom. How those elements are cooperation with each other and what are essential factors of it? In order to explore those aspects, we attempt to construct a multi-agent based avatar to organize purposely-designed behavior while manipulating each element in multiplayer context.

Keywords: Inter-personal Coordination, Intra-personal Coordination, Transformable Robot, Bernstein Problems

1. はじめに

動物などの巧みさを伴う行為の多くは、多数の自由度を有する筋骨格系における要素間の協調によって成し遂げられている[1]。こうした協調はどのように獲得されるのだろうか。これらのことを探るために、本研究では多人数（3名）でそれぞれの要素を操りながら合目的な行為を組織するマルチエージェント型アバターの構築を試みた（図1）。

本研究で構築したマルチエージェント型アバター COLUMN（図2）は身体に多数の自由度を内包している。その身体要素間のせめぎ合いからは、転がりなどの移動運動が立ち現れる。本稿ではこの移動運動の成り立ちとメカニズムを分析し、操作者の習熟、操作者同士の適応、及び操作者たちの間で行われた運動の効率化など、明らかになった知見と展望を述べる。

2. 研究の背景

2.1. 「心の社会」

ミンスキーは「心」とはたくさんの「小さなプロセス」の集合によって出来ていると述べ、この集合のことを「心の社会」と呼んだ[2]。この「小さなプロセス」は「心」を持たないエージェントであり、一つひとつは単純な振る舞いでしかない。しかし、これらのエージェントたちが様々な方法を経て、お



図1. インタクションの様子
Fig.1 Child interaction with COLUMN



図2. COLUMN 概観
Fig 2. COLUMN (Core Less Unformed Machine)

互いに協調し、それらが社会といえるようなものを形成することで、いつの間にか「心」のような複雑なものになるという。

本研究ではミンスキーの「心の社会」になぞらえ、単一のアバターになりこむ多数の参加者等をエージェントに見立てる。そして多数のエージェントの構成する身体をマルチエージェント型アバターと呼ぶ。

2.2. ベルンシュタイン問題

複数の小さなプロセスがお互いにせめぎ合っているという構図は、視点を変えれば、動物の筋骨格系に備わる自由度が織り成す「協調」に近い。

たとえば、人の身体に備わる筋肉や関節などの自由度は 100 を超えていると言われており、一つ一つの単純な行為はこれらの自由度がお互いに協調し身体の外側にある環境と相互行為を重ねながら生み出されるものである[3]。一方で、身体の自由度について一つ一つの組み合わせや状態、文脈の成り立ちなどの制御を考えたとき、その組み合わせは膨大となる。これらの制御をどこか中枢によって意識的に一括制御されることは現実的ではないとベルンシュタインは問題提起を行った。この問題に対し、ベルンシュタインは環境との相互行為の中に問題を解決するヒントがあると考え、環境に内包される要素と人体に内包される自由度によって構築される協応構造という仮説を提唱した。

「自由度」という個々が目的を持たない“小さなプロセス”が、身体の外側にある環境を利用して「協調関係を構築する」ことで一つの「志向性を持った身体[4]」を形作るという構図において、「心の社会」と“協応構造”はどちらも要素間の協調を要するという点で近い関係を持つ。

2.3. 協調によるエージェントのつながり

筆者らは次章で述べる「多くの多自由度を内包した変形ロボット COLUMN」について、その操作の方法を研究している。運動方程式などの数理モデルによる複雑系の制御は、ベルンシュタインの自由度の問題然り、極めて膨大な計算量となるため現実的ではない。一方、人が COLUMN を操作することは、それほど難しいことではなく、おおよそ 1 時間程度のトレーニングを経ることで、ほぼ思い通りの方向へ移動できるようになることが確認されている。

人が COLUMN を操作するとき、何が起きているのか。これまでの研究では、COLUMN の操作が思い通りにならないことで「もどかしい」と感じるものが、操作の習熟の動因になることが予見されている[5][6]。しかし、その具体的なメカニズムについて



図 3. ジョイントとアクチュエータ
Fig3. Mechanism of COLUMN

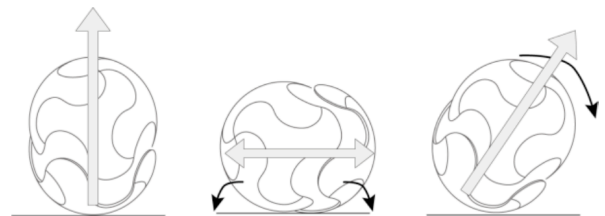


図 4. COLUMN の変形と転がり運動
Fig4. Transform and rolling motion of COLUMN

は明らかになっていない。

本稿では、協調のメカニズムについて、「人＝エージェント」「COLUMN (アバター) = 単一の身体[7]」と置くことで、ミンスキーの述べた「心の社会」からの観点、そしてベルンシュタインの述べた「協応構造」という観点の 2 つからアプローチを試みる。

3. COLUMN プラットフォーム

3.1. COLUMN

COLUMN(Core Less Unformed Machine)は、8 枚の外殻ユニットと 12 個のアクチュエータを内包した変形ロボットである。各々のアクチュエータは外殻ユニットに接続され、内部で立方体のような構造を形成している。この構造により、アクチュエータを伸長させると外殻ユニットが押し上げられるため、COLUMN は変形する (図 3)。

COLUMN は身体の変形を利用して移動することが可能である。基本的な移動方法としては、重心を崩すことによる「転がり」、あるいは「這う」ように伸縮を繰り返すというものがある (図 4)。そのため、「タイヤ」や「足」といった移動するための機構を必要とせず、身体に内包された多数の自由度を巧みに利用して移動することを最大の特徴としている。

3.2. Gear

COLUMN の操作には Gear を呼ばれるコントローラを用いる。Gear は内部に加速度センサ、無線通信モジュール、バッテリーなどが内蔵されており、Gear にかかった加速度情報をリアルタイムでホストコンピュータに送信するというメカニズムになっている (図 5)。Gear の加速度情報は COLUMN 内のアクチュエータの開度に直結しており、Gear に加わる加速度がそのまま COLUMN の変形量として反映される。

Gear 内部の加速度センサを容易に反応させるために、操作方法としては「振る」ことが望ましい。強く Gear を「振る」と COLUMN は大きく変形し、小さく「振る」と COLUMN は小さく変形する。また、操作をやめると COLUMN は元の球体の状態に戻る。

3.3. COLUMN と Gear の関連付け

COLUMN は 3 名の操作者によって操作されることを想定している。一方で COLUMN 内のアクチュエータは 12 個あるため、これらの自由度をそれぞれの操作者 (Gear) に割り振らなければならない。そのため、COLUMN 内のアクチュエータが立方体状に接続されていることを利用して、同じ方向を向いているアクチュエータ 4 本を 1 セットにして駆動させるように設計している。同じ方向を向くアクチュエータは図 6 のように合計 3 方向あり、これら一つひとつの方向への伸縮をそれぞれ一つづつの Gear が対応することで、3 名での操作に対応した (図 6)。

4. 評価実験

この実験では被験者の「操作量」「会話の内容」、そして「COLUMN の振る舞い」を記録し、協調について以下の点を考察するためのデータ収集を行った (図 7)。

- ・ 協調成立までの過程
- ・ 協調の成因
- ・ 操作者が獲得したと考えられるスキル

4.1. 実験概要

タスクとして「COLUMN をゴールまで移動させる」ことを設定した。ゴールまでの距離は COLUMN の一回転に相当する 1200mm とし、ゴールの幅も 1200mm とした (図 8)。試行 1 回あたりの制限時間は 5 分とし、この制限時間内に安定してゴールできるようになるまで試行を繰り返してもらった。

被験者の詳細は以下のようにになっている。

- ・ 男性 13 名、女性 2 名 (平均年齢 22.6 歳)
- ・ 1 グループ 3 名で構成
- ・ グループのメンバーは知人同士で構成

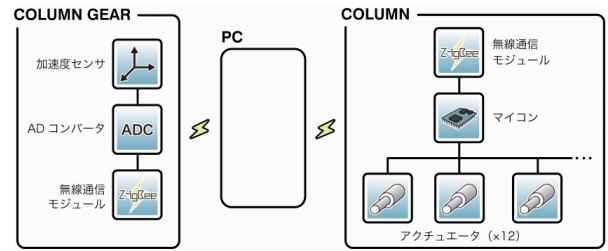


図 5. システム構成

Fig5. System architecture

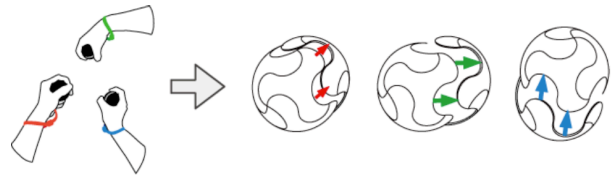


図 6. コントローラとアクチュエータの関係

Fig6. Relationship between controller (users) and actuator (COLUMN)



図 7. 実験の様子

Fig7. Experimental setup

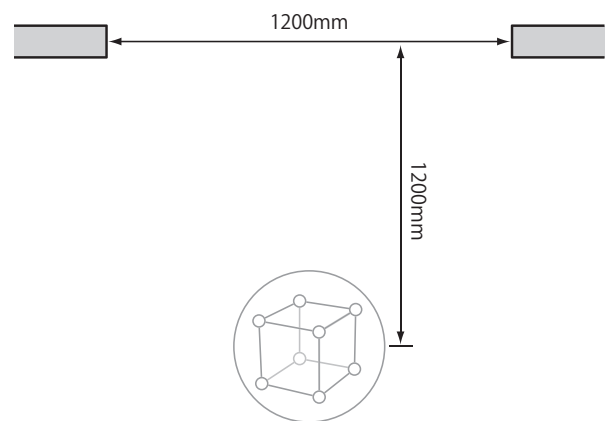


図 8. ゴールと COLUMN の位置関係

Figure 8. Position of GOAL and state of the COLUMN

5. 結果と考察

上述した状況に置かれた操作者たちが、タスクの達成を試みる過程を観察した。以降にそのグループ毎の比較、及びグループ内に現れた特徴的な振る舞いについて述べる。

5.1. 課題の達成傾向

表1にグループ毎の試行回数、及びその試行毎の「転がり」回数を示す（「転がり」はCOLUMNの身体が直前の状態から90度以上回転した状態であると定義する）。また、ゴール地点へ到達した試行はセルの網掛けによって示す。

結果として、実験に参加したグループ全てが課題を達成した。このことから、COLUMNを通じて操作者間の協調が成り立ったと言える。

一方で、グループ毎にタスクを達成するまでの時間・試行回数と転がった回数との間に関係は認められないため、習熟によってより活発にCOLUMNを動かせるようになるわけではないことが見受けられる。このような、試行回数と転がり回数の関係が認められないにもかかわらずタスクを達成しているという点は、協調によって生み出されたCOLUMNの運動がタスク達成のために徐々に洗練化されていることを意味している。このことから、タスク達成は偶然ではなく、操作者間で試行回数を経るごとにCOLUMNの身体に特化した協調を構築しているものと考えられる。

表1. 課題達成までの試行回数と転がり回数

Table1. Number of rolling to archive the goal for each group

| | Group1 | Group2 | Group3 | Group4 | Group5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Trial1 | 16 | 6 | 18 | 18 | 6 |
| Trial2 | 13 | 31 | 13 | 15 | 8 |
| Trial3 | 13 | 25 | 18 | 14 | 11 |
| Trial4 | 25 | 23 | 14 | 14 | 6 |
| Trial5 | 10 | 20 | 12 | 9 | 14 |
| Trial6 | 14 | - | 21 | 13 | 13 |
| Trial7 | 15 | - | 28 | 9 | 3 |
| Trial8 | 9 | - | - | 8 | 17 |
| Trial9 | - | - | - | - | 8 |
| Trial10 | - | - | - | - | 13 |
| Trial11 | - | - | - | - | 11 |
| Trial12 | - | - | - | - | 34 |
| Trial13 | - | - | - | - | 5 |

5.2. 協調の成因

操作者間の協調が発達していく過程においては、以下のような流れを確認している。

1. 自信の役割の認識
2. 移動するための方法の理解
3. 思い通りの方向へ移動するための方法の理解

全てのグループにおいて同様の流れが生じることを確認しており、これらの流れはCOLUMNというアバターへの多人数のなり込みを成立させるための定まった文脈であると考えられる。

協調の結果として現れる操作者たちの入力の違いについて可視化したものを図9に示す。それぞれのグラフを比較すると、実験の試行が始まった当初(図9上段)は、入力操作の様相は混然とした様相であり、操作者それぞれの操作が重なっていることが見て取れる。撮影した動画の分析においても、操作者間同士に協調を成立させるための行為(たとえば、会話や身振り手振りなど)は確認できない。この時点において、COLUMNはもぞもぞとするばかりでなかなか移動することができない状態にある。この状態においても被験者たちはCOLUMNを転がすことは実現できているものの、その行為はゴールへ移動を意識しているというよりは、転がることそのものに意識が集中していることが見受けられる。

その後、試行回数を重ねた実験中盤(図9下段)になると、それぞれの入力操作は独立し、整然とした様相を呈している(グループ全体の操作量が減っている)。この時点において、操作者たちは既にCOLUMNを効果的に転がす方法を身につけていると考えられる。しかし、転がりがゴールとは関係の無い方向へ向かうことが多々、確認できることから、思い通りの方向へ転がす方法は獲得されていない。

中盤以降になると、操作者間においてCOLUMNの操作方法に関する相談が積極的になされており、COLUMNをゴールへ近づけようとする協調行為が確認できる。特に興味深いのは、操作者間同士で同時に操作することが無くなった点である。同時に操作せず、一人ひとりが個別に操作することで、問題を簡略化し理解しやすいものとしていると考えられる。問題を簡略化することで、COLUMNが転がった後も自分の担当を見失わずに済み、次の「転がり」に対応できる。

また、転がった後しばらくの間、誰も操作せずに次の操作によってどの方向へ移動させるのか相談しあうなどの行為が生じた。これは、一つひとつの行為が慎重になり、転がりごとに着実にゴールへと移動させるための行為であると考えられる。

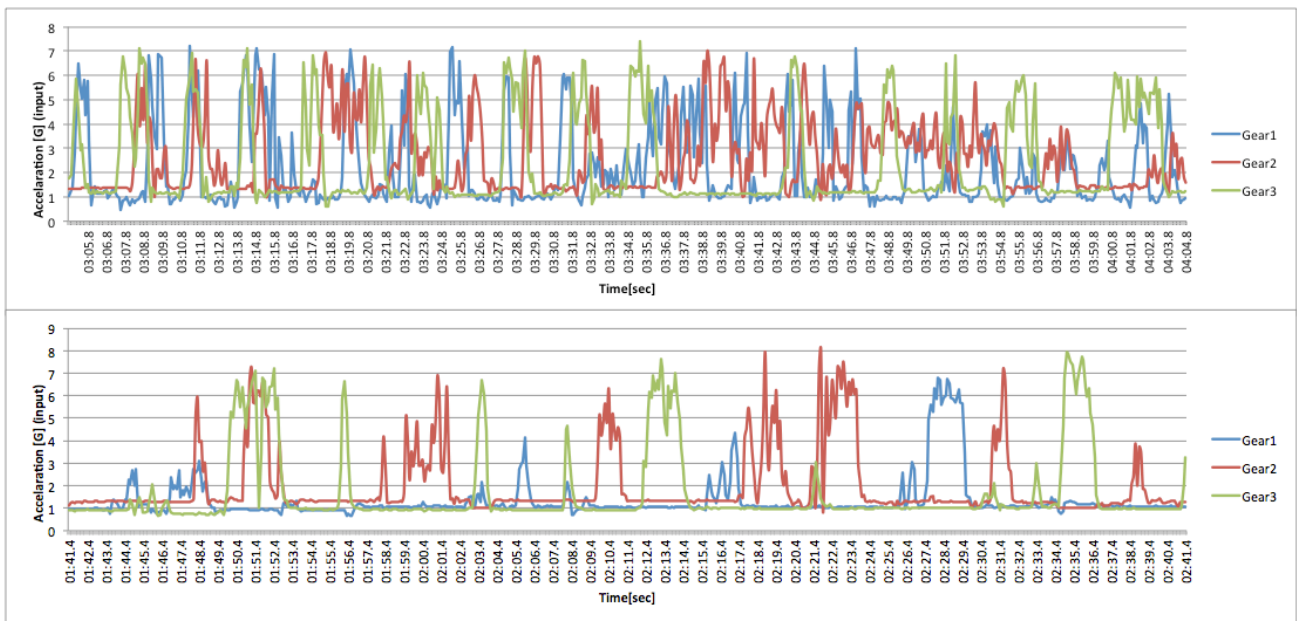


図 9. Group5 における第 2 施行と第 12 試行の入力モードの比較
 Fig 9. Comparison between Group5 Trial2 and Trial12

以上の流れを経た協調の成立を全てのグループにおいて確認できた。しかし、COLUMN を思い通りの方向へ進むための役割分担など細かい点において、グループ毎に違いが生じている。たとえば、グループ 2 のように早い段階でゴールを実現しているチームの場合、一人の操作者がリーダーとなっていた。あるいは、グループ 5 のようになかなかゴールできなかったチームでは、試行後半まで会話などによる相談が生じず、ただ黙々と操作しているだけであった。結果として、全てのグループは上記の流れを経てはいるものの、それぞれ協調に到るまでに経験する理解の順序は全て異なっている事がわかる。

5.3. スキルの獲得と運動の効率化

前記のとおり、熟練者は初心者に比べ少ない操作量で COLUMN を自在に操る。このことは、操作量のグラフだけではなく、COLUMN 内のアクチュエータにかかる負荷の情報からも見て取ることが可能である (図 10)。操作が効率化することによって、COLUMN の身体の動きも洗練されることは一見、当たり前前のように見える。一方で、必ずしも少ない操作量が、COLUMN のアクチュエータの負荷の軽減に繋がるわけではない。なぜなら、何も操作を加えていない状態においても COLUMN の自由度自体によって身体は変形しており、その変形をもとに戻そうとアクチュエータは活動しているからである。

下手な操作を行うと、ただでさえ変形している身体が更に変形してしまい、アクチュエータの負荷は大きくなる。初心者の場合はこの現象が顕著で、アクチュエータは常に高負荷な状態に置かれている。

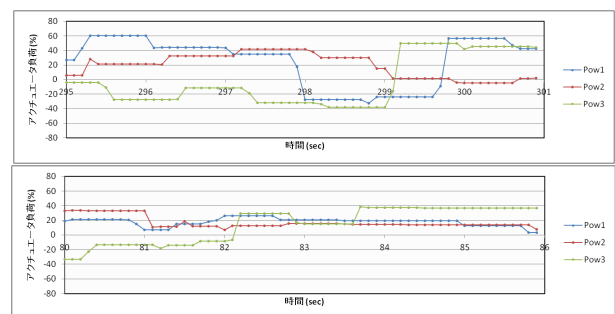


図 10. アクチュエータの負荷
 (上段：初心者 下段：熟練者)
 Figure 10. Load of Actuators of COLUMN
 (Upper: Beginner Lower: Adept)

しかし熟練者の場合、一つひとつの行為がシンプルに完結しており、何も操作しない状態においても、アクチュエータに掛かる負荷は初心者に比べ小さい。このことから、熟練者は COLUMN の体について一定の理解をしており、一つの転がり試行の後に来る次の試行へのつながりに関しても、何らかのスキルのようなものを獲得しているためであると考えられる。

同様の事例として、COLUMN 自体の変形によって、なかなか転がらない安定した状態に陥った場合の熟練者の振る舞いが挙げられる。この場合において、初心者はどうしていいかわからず、むやみに変形を繰り返すだけで、次の転がりまでに相当の時間をかけていた。熟練者の場合は、COLUMN をできるだけ転がりやすい球状に戻そうとする振る舞いが確認でき、この点においてもスキルを獲得していると考えられる。

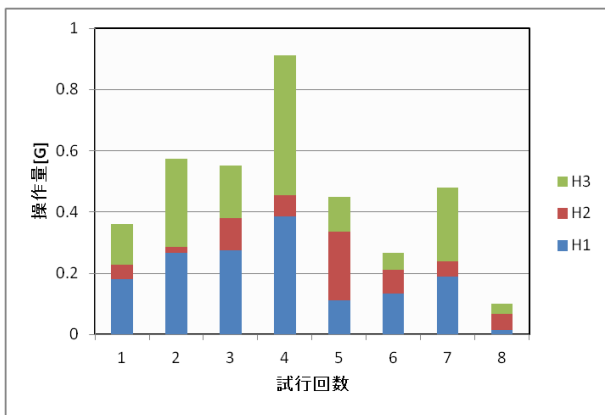


図 11. 操作者間の平均操作量の差

Figure 11. Difference of average input quantity for each manipulators

特に、この安定状態に陥った場合、一人の操作のみで抜け出すことは困難である。そのため、他の操作者と協調して操作しなければならないが、熟練者の場合はこの協調がうまく構築されているため、状態を抜け出すことが可能であると考えられる。

Gear の操作の操作量についても、特徴的な結果が得られている。初心者の場合、実験の試行毎の平均操作量 (Gear を振る量) は操作者それぞれバラバラであった (図 11)。しかし、実験の試行回数が増えてくると、グループ内の操作者間同士ではほぼ同じ平均操作量に収束していた。このことから、以下の 2 点の可能性が考えられる。

- ・ グループ内で獲得される操作方法は操作者間で共有される
- ・ 役割のスムーズな交代が構築される

前者は、操作者間で相談を重ねながら操作のスキルを獲得していくため、試行を重ねるといつの間にか操作の方法が似てしまうなどの理由が考えられる。後者は、「転がり」から「転がり」までの時間にムラが無くなり、一人がずっと操作を続けるという状況が無くなるためであると考えられる。どちらも協調によって獲得されたスキルの一部であると考えられ、場合によっては両方のスキルが混ざった状態の存在も推測される。

6. まとめ

本研究では多人数の協調的な操作によって行為を組織するマルチエージェント型アバターとして、COLUMN という球状ロボットを構築した。本稿では、操作者がお互いの息を合わせてゴールへ向かうという目標を達成する過程を観察し、その知見について述べた。

最初、操作者たちは COLUMN の動かす方法が分からずバラバラに操作を行っていたものの、最終的にはお互いの操作に合わせて自分の操作を調整し、目的の場所に辿り着く事ができるようになった。この過程において、操作者たちはうまく協調を行うための「会話」や「身振り手振り」などの社会的交渉、自分の役割を知るための「微小な操作」などの知覚行為、入力のリニア回避といった COLUMN の操作に関する構造理解など、COLUMN を思い通りに動かすためのスキルのようなものを見出していた。このことから、COLUMN をゴールに導くというタスクを達成するためには、幾つものスキルを組み合わせ、操作者間におけるスキルの共有が必要といえる。

以上のように、最初はバラバラの方向を向いていた「小さなプロセス」とも言うべき操作者たちが、アバターをうまく動かすためのスキルを獲得し共有することで、設定されたタスクを達成していた。

今後は、操作者たちがスキルを獲得するメカニズムについて知見を深めていくことで、COLUMN そのものによる自律的なスキルの獲得を実現したいと考えている。また、このスキルの獲得の構成的な理解は、コンピュータ-ユーザ間における協調の構築や、システムによるユーザのスキル獲得の支援への応用を期待できる。最終的には、自律的に環境を利用するロボットの制御方法の確立に繋げていきたい。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員奨励費、および科研費補助金 (基盤研究 B 21300083) により行われている。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] エドワード・S.リード著、細田直哉訳・佐々木正人監修:『アフォーダンスの心理学 生態心理学への道』, 新曜社 (2000).
- [2] マーヴィン・ミンスキー (安西 訳):『心の社会』, 産業図書 (1990).
- [3] ベルンシュタイン N.A (工藤 訳):『デクステリティー 巧みさとその発達』, 金子書房 (2003).
- [4] Daniel C. Dennett (土屋俊 訳):『心はどこにあるのか』, 草想社 (1997).
- [5] 竹田, 岡田, 他: Column:個人間 協調を引き出す「もどかしさ」について, ヒューマンインタフェース学会シンポジウム, (2012)
- [6] 岡田美智男:『口ごもるコンピュータ』, 情報処理学会編 情報フロンティアシリーズ (9), 共立出版 (1995).
- [7] 岡田美智男, 三嶋博之, 佐々木正人:『身体性とコンピュータ』, 共立出版 (2000).