Sociable Dining Table: 「コンコン」インタフェースに向けた相互適応モデルの検討

Sociable Dining Table: Studies on a mutual adaptation model for “KonKon” interface

角 裕輝[1] 鴨田 貴紀[1] 吉池 佑太[1] 岡田 美智男[1]

Yuki Kado[1], Takanori Kamoda[1], Yuta Yoshiike[1], and Michio Okada[1]

[1] 豊橋技術科学大学 知識情報工学系

[1] Department of Knowledge-based Information Engineering, Toyohashi University of Technology

Abstract: In this research we developed a creature-based Social Dining Table that can communicate through a knocking sound, which in Japanese is pronounced “KonKon.” Our main focus is to create a minimal number of cues for proto-communication in order to establish social interactions between a creature and a human. This is created using a mutual adaptation model for achieving a more ideal adaptation during the interactions. Through the experimental results, we discuss the concept of a creature and show the effectiveness of the communication –protocol on the “KonKon” interface.

1.はじめに

普段生活をしている中で，家族の誰もが利用する「ダイニングテーブル」は，単に食事をする場としてだけでなく，家族団らんの場を支えるコミュニケーションスペースとしての役割も担っている．

このようなダイニングテーブルの上にある，ポットやお皿が生き物のように振る舞い，更に私たちとコミュニケーションする存在となったなら，どのような意味を持つだろうか．たとえば，私たちがテーブルをノックする．そのとき，自由に動いていたポットたちは，そのノックに気づき，ノックの意味を推測しながら，私たちに近づいたり，遠ざかる，或いは違った速度でそれらの動作をなしたりする．

このようにテーブル上のポットやお皿と私たちとの間でノック音を介したコミュニケーションにおいて，オリジナルなルールを創り出すことができれば，そのプロトコルに関しての事前知識を必要としないリテラシーフリーなインタフェースを実現することができるだろう．我々は，このようなインタフェースを「コンコン」インタフェースと呼び，その実現に向けたプラットフォームとして Sociable Dining Table の構築を進めてきた．その様子を図 1 に示す．

テーブル上にはポットやお皿などの「生き物らしさ」や社会的な表示機能を備えたモノたち（Sociable Things）が存在する．人は「テーブルのノック」という最小の手がかり（minimal cues）[1]を通して，

図 1：Sociable Dining Table

Sociable Things とコミュニケーションを行う．そして，Sociable Things と共に生活していく中で，人は Sociable Things との接し方を学び，Sociable Things も人の行動様式を把握できるようになることを目指している．

本稿では，リテラシーフリーな「コンコン」インタフェースの実現のために，まず Sociable Things を介した WOZ 実験を行い，人同士の間の相互適応の過程を観察した．また，その結果に基づいて，Sociable Dining Table の学習モデルについて必要な要素について考察し，学習モデルの構築を行った．さらに，ここで構築した学習モデルにより人との相互行為による検証実験を行い，その結果について分析し，学習モデルの検証を行った．これらの結果と考察を述べる．

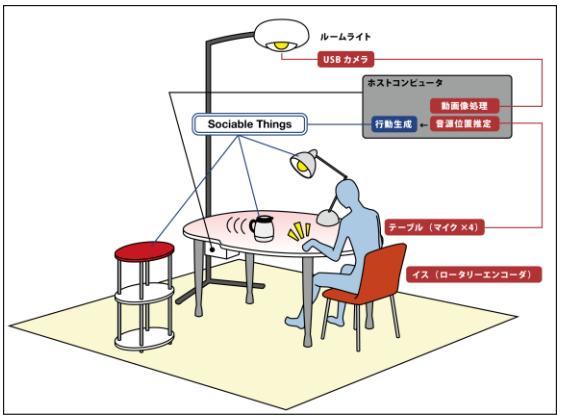

図 2：Sociable Dining Table の外観

2. Sociable Dining Table

Sociable Dining Table は 10 年後の生活空間を想定したダイニングテーブルである．以下にシステムの概要及び構成を示し，インタフェースとしての要素について述べる．

2.1 概要

Sociable Dining Table の外観を図 2 に示す．テーブルの上では，社会性を備えたポットやスナックプレートなどの Sociable Things が自由に動き回っている．Sociable Things は，テーブルの周りにあるモノの形をそのまま身体とし，その内部には，アクチュエータやセンサなどが搭載されている．アクチュエータによって Sociable Things はテーブルの上を動き回ることができ，「志向的な構え」を引き出すような振舞いや基本的な社会的表示を行うことができる．

Sociable Things は私たちと関係性を築くにあたり，人の身体と同様な形を持つことによる「実体としての同型性」ではなく，その振る舞いによって自身と環境との切り結び方を人に示し，「関係としての同型性」を実現する[2]．また，テーブル上空に設置されているルームライト内にカメラ，テーブル裏にマイクを取り付けることで，ヒトの動きやテーブルのノック音などをセンシングすることができる．

2.1 システム構成

システム構成を図 3 に示す．Sociable Dining Table は，Sociable Things，環境に埋め込まれたセンサ，ホストコンピュータによって構成されている．Sociable Things は，無線 LAN 通信モジュール(WiPort)，モータ，1 チップマイコン(AVR ATMEGA128)，落下防止センサ(フォトリフレクタ)という必要最小の要素で構成されている．落下防止センサは持ち上げ検出センサとしても機能し，ポットが持ち上げられたことを検出する．

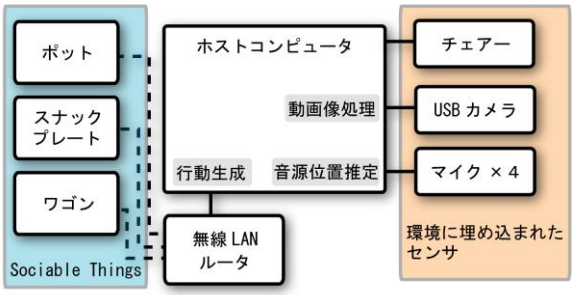

図 3：システム構成

また，底面に組み込まれている 2 個のモータによって，前進，後退，左右の旋回を行う．

テーブルの周辺に埋め込まれているセンサによってヒトと Sociable Things とのコミュニケーションを支援する．センサとして，テーブルの裏にマイクを 4 つ，ルームライトに USB カメラ，チェアーにロータリーエンコーダを組み込んでいる．センサからの情報に基づく動画像処理や音源位置推定は，テーブル裏のホストコンピュータで集中的に演算し，無線 LAN を通して制御信号を Sociable Things に送信することとした．

このシステムによって，テーブルを囲む家族がどこに座っていてもノックの位置とパターンを検出する．また，人からの行為に対する Sociable Things の随伴的な行為を生成することができる．

2.3「コンコン」インタフェースに向けて

本研究では，人からシステムに対する適応だけでなく，システムから人への適応について考慮する「相互適応学習（mutually adaptive learning）」[3]の観点から Sociable Dining Table のインタラクション設計について議論している．その一環として，「テーブルのノック」という最小の手がかりを用いてコミュニケーションを行い，ノックに対して相手の積極的な解釈を引き出しながら，相互適応の可能性を検討した．テーブルへのノックは，それ自体に具体的な意味を持たないが，その意味の不定さによりコミュニケーションする相手の積極的な解釈を引き出すことができる．また，ノックは子供からお年寄りまで誰にでも可能な行為である．ノックを元に相互適応を実現できれば，リテラシーフリーな「コンコン」インタフェースとして利用することできる．

これらのことを実現するために，まず，Sociable Things を人に背後から操作してもらい，人と Sociable Things を介した人同士でノックによるプロトコルの共有ができるかを観察実験で確認した．

3. 人同士の相互行為による相互適応実験

3.1 概要

Sociable Dining Table における相互適応モデルを構築するため，WOZ（Wizard of OZ）手法にならい，Sociable Things を介した人同士の相互行為による相互適応実験（以下，WOZ 実験）を行った．実験には 2 人 1 組の被験者が参加した．被験者は，Sociable Things であるスナックプレートを別室から遠隔操作する「操作者」と，Sociable Dining Table の傍でスナックプレートに対しノックによって指示を与える「指示者」に分かれ，協力して課題を行う．課題は操作者と指示者との相互行為が断続的に繰り返される状況が望ましいことを考慮し，ノックによるスナックプレートの道案内タスクを設定した．

3.2 目的

本実験の目的は，人と Sociable Things がノックと振る舞いによるコミュニケーションを行うとき，両者の関わりの過程で共通のプロトコルが見出されるか確認し，その過程を観察することである．

3.3 実験方法

被験者らには，「スナックプレートを移動させ，3 点のチェックポイントを通過し，ゴールに導く」という課題を与える．操作者は，課題は速く達成すればするほど良いものとし，課題達成には 20 分間の制限を与え，これを 2 回繰り返した．チェックポイント及びゴールは図 4 に示すように，試行毎に変更した．チェックポイントとゴールは教示者にのみ通知され，操作者にはわからない．このため課題を速やかに達成するためには，被験者らはお互いの行為の意図を見出し，共有する必要がある．したがって，スナックプレートがチェックポイントを通過し，ゴールに至ることができれば，被験者らはある種のプロトコルを共有したと考えられる．

指示者は Sociable Dining Table のある部屋で，操作者は別室でノート PC 上のインタフェースを用いてそれぞれ実験を行う．インタフェースには，テーブル上のスナックプレートの座標と方向が示されたアイコンと，ノックの有無を示すシグナル，及び実験の経過を表示するメッセージボックスが配置されている．実験中に指示者がノックを行うと，操作者のインタフェースにノックの音が出力され，シグナルが点滅する．また，チェックポイントを通過した場合とゴールへ到達した場合にメッセージが表示される．操作者は以上の情報を用いてスナックプレートをノート PC のキーボードで操作する．

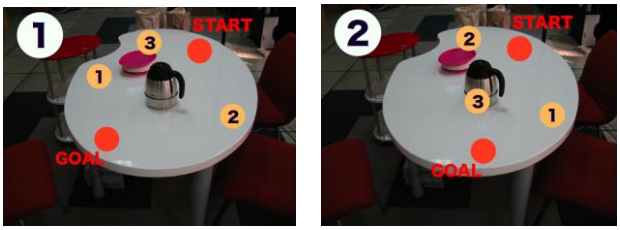

図 4：試行毎の道案内タスクの経路

3.4 分析方法

共有されたプロトコルを調べるため，毎試行終了時に操作者と指示者それぞれに対して質問紙を用い，共有したと思われるプロトコルについて自由記述で回答を求めた．また，指示者の実験中の振る舞いをビデオに記録し，プロトコルが共有される過程を観察した．

3.5 結果

実験は 30 人（19〜24 歳までの大学生，大学院生，男性 28 名，女性 2 名）の被験者を 2 人一組のペアにした計 15 組で行った．実験の結果，1 回目，2 回目両方の試行の終了時刻までに道案内タスクを達成できたのは 14 組であり，残りの 1 組は，両方の試行において達成することができなかった．

また，質問紙より，指示者，操作者がそれぞれ共有したと感じたプロトコルを比較した結果，完全にお互いのプロトコルが一致していたペアは 4 組（A グループ），一部一致していたペアは 9 組（B グループ），まったく一致していなかったペアは 2 組（C グループ）であった．

3.6 考察

観察結果より，Sociable Dining Table のための学習モデルを構築するために，以下の 2 点が重要であることが分かった．

(1)シンプルなノックパターン

複雑なノックのパターンは，プロトコル共有の際に混乱しやすく，考慮しなくても良いことが分かる．従って，例えば，ノックの回数で区別するようなシンプルなノックのパターンのみでも，振る舞いと対応付けることは可能であると考えられる．

(2) 強化学習の要素を備えた適応過程

チェックポイントの通過などの共通のイベントが起こった際に，指示者と操作者はお互いに行動遍歴を参照し，ノックのパターンとスナックプレ

ートの操作を対応付けていた．このとき，指示者と操作者の行動は，ターンテイキングのようにメリハリのついた動作を行うことが重要であった．また，プロトコルの共有過程においては，指示者のノックによる割り込みの有無が，正と負の報酬として利用されていた．

以上の 2 点より, WOZ 実験により観察されたプロトコルの共有過程は，報酬と行動遍歴の参照に基づいた強化学習の要素を備えた適応過程であると言える．

4. 学習モデルの検討

WOZ 実験によって得られた知見を基に, 相互適応を実現するための学習モデルを構築する．

4.1 シンプルなノックパターン

ノックの判別は，一連の連続するノックの回数に基づき行う．ノックの回数は，間隔が 2 秒以内である連続するノックをカウントすることで判別する．

4.2 強化学習の要素を備えた適応過程

前節で述べたとおり，プロトコルの共有過程は強化学習の要素を備えた適応過程であると考えられる．本稿では，人のノックに対してスナックプレートの振る舞いを適応させるための学習アルゴリズムとして，強化学習の Actor-Critic 手法を採用する．

Actor-Critic 手法は，方策を決定する Actor（行動器）と行動に対する評価をする Critic（評価器）からなる．Actor は，人からのノックがあった場合に，現在の状態 s から次に選択すべき行動 a を行動決定関数により決定する．Critic は，Actor が行動を決定した後に人の反応から報酬 r を得て TD 誤差を計算し，行動決定関数および価値関数 $V(s)$を更新する．価値関数の更新パラメータは割引率 γを 0.9, ステップサイズパラメータ αを 0.5 とした．

4.3.1 ノックパターンと状態の対応

強化学習における状態空間は既知のものとして最初にモデル化されなければならないが，どのようなノックがなされるかは未知である. そこで本稿では，ノックのパターンを先に入力されたノックから順に，状態s_1，状態s_2，…と割り当てることとする．ノックが状態に割り当てられる様子を図5に示す. 新規のノックが入力されたとき，割り当て済でない状態がある場合には，入力されたノックのパターンをその状態に割り当て，そうでない場合，最も利用されていない組み合わせを削除し，削除した状態に新規のノックのパターンを対応させる．ここでは，記憶する組み合わせは8状態とした．

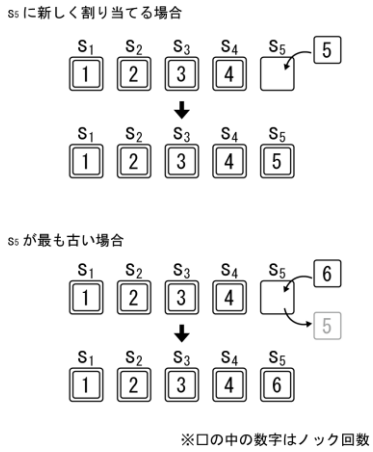

図5：ノックパターンと状態の対応

4.3.2 行動の決定方法

行動は行動決定関数に従い，確率的に決定する．行動決定関数には正規分布を採用し，各状態には，それぞれの行動決定関数を司る平均 μ と分散 σ を設定する．Actor は状態 s_tから次の状態 s_{t+1}へ遷移するとき，現在の状態 s_t での平均 μ と分散 σにより形成される正規分布に従い行動 a_tを決定する．行動は，Sociable Things の振る舞いである「前進」「右旋回」「後退」「左旋回」とし，それぞれ 0〜3 の離散値を割り当て，正規分布に従い算出された値を四捨五入することで，行動を決定する．

4.3.3 行動の更新方法

行動決定関数はクリティックによって算出された TD 誤差に基づき更新する．TD 誤差が正の場合，μ と σは以下の式によって更新される．ここで s_t，現状態であり，a_tは現状態で選択された行動である．

- μ の更新式

$$\mu(s_t) \rightarrow (\mu(s_t) + a_t) / 2 \quad (1)$$

- σ の更新式

$$\sigma(s_t) \rightarrow (\sigma(s_t) + |a_t - \mu(s_t)|) / 2 \quad (2)$$

4.3.4 報酬の決定

報酬は，ノックをした時のスナックプレートの行動に対する人の反応に基づき与えられる．人が見守り行為をした場合には正の報酬，すぐにノックをして行動を中断した場合には負の報酬を与える．具体的には，動作を開始してから 2 秒以上見守り行為が行われた場合，正の報酬を，2 秒以内に次のノックが行われた場合に与える．報酬は連続値であり，動作開始直後にノックがあれば最小値の-1 が，2 秒以上では最大値の 1 が報酬として与えられる．

1. 人がノックを行うと，ノックパターンに基づき，状態 s_t が決定される．
2. Actor が s_t における行動決定関数に基づき，乱数を発生させ，乱数を四捨五入して行動 a_t を決定する．
3. スナックプレートは行動 a_t に従い行動を開始し，一定時間動作したのち，停止するという動作を繰り返す．
4. 次のノックが行われると，ノックパターンに基づき状態 s_{t+1} が決定され，ノックまでの時間に基づき報酬 r_t が決定される．
5. Critic が TD 誤差を算出する．
6. Actor が TD 誤差に基づき，状態 s_t の行動決定関数を更新する．
7. Critic が TD 誤差に基づき，状態 s_t の価値関数を更新する．
8. 状態 $s_t \rightarrow s_{t+1}$ として 2.に戻る

図 6：学習の流れ

4.3.5 学習の流れ

以上を踏まえたうえで，学習がどのような流れとなるかを図 6 に示す．

5. 学習モデルの検証実験

5.1 概要

構築した学習モデルを実際に用い，人間との相互行為により，評価実験を行った．評価実験として，WOZ 実験と同様の道案内タスクを設定した．

5.2 目的

本実験の目的は，構築した学習モデルによって Sociable Things が，相互に適応し，プロトコルを共有することができるかを検証することである．具体的には，道案内タスクが達成され，またタスクに要する時間が試行毎に減少するかを観察することにより，Sociable Things が人とのプロトコルを共有することができるか検証する．

5.3 実験方法

本実験では，WOZ 実験と同様道案内タスクを設定した．被験者は指示者となり，学習モデルによって動作するスナックプレートに対してノックを行う．実験の条件は，WOZ 実験と同様の設定で行った．但し，被験者に教示する際，システムの要件としてノックは前述の通り回数のみで弁別する旨を新たに教示することとした．

5.4 分析方法

道案内タスク中のスナックプレートの行動に関するデータを記録した．記録するデータは試行を開始してからの経過時間，スナックプレートの座標及び角度，ノックの回数とそのノックに対して行った行動，学習パラメータ（TD 誤差，価値関数，各状態における平均及び分散）とする．以上の各データを分析対象とする．

ここで，時系列的な共有状況を分析，評価するためにプロトコルの「方向正答率」という指標を設定する．方向正答率は，人からのノックに対する Sociable Things の行動が，チェックポイントやゴールに向かうためのものであったどうかを示す指標である．方向正答率は，0～1 の範囲であり，目的地の方向を向くほど高い値を示すものとした．算出方法を表 1 に示す．ここで ϕ は $-180 < \phi \leqq 180$ であるが，旋回については一方向の行動が共有されれば課題が達成できるため，方向正答率は回転方向を問わないこととする．

表 1：方向正答率の算出式

	前進	旋回	後退
$\phi < 90^\circ$	$\frac{90^\circ - \phi}{90^\circ}$	$\frac{\phi}{90^\circ}$	0
$\phi \geqq 90^\circ$	0	$\frac{180 - \phi}{90^\circ}$	$\frac{\phi - 90^\circ}{90^\circ}$

次に，被験者と学習モデルとの間で共有された具体的なプロトコルについての分析方法について述べる．本実験では，毎試行の終了時において，被験者が共有されたと感じたプロトコルと，学習されたデータを比較し，プロトコルの共有状況を検証する．被験者の主観的なプロトコルは質問紙によって回答を求め，学習モデルについてはノックと状態の割り当てと，行動決定関数の μ 及び σ を利用した．

5.5 実験結果

実験は 10 人（20～24 歳までの大学生，大学院生，男性 6 名，女性 4 名）の被験者に対して行った．

実験の結果，10 人全員が 2 回の試行を時間以内に達成することが出来た．表 2 に被験者とスナックプレートの間に共有されたプロトコルについて示す．ここで共有されたプロトコルは，試行終了時に質問紙によって回答を求めた被験者の主観的なプロトコルと，試行終了時の行動決定関数における各状態の μ を四捨五入した値が一致し，かつ $\sigma < 0.5$ であった組み合わせである．なお，表中の数字はノックの回

表 2：各被験者の共有したプロトコル

被験者	前進	後退	右旋回	左旋回
s1	- / 4	-	1	2
s2	-	1, 2 / 1, 4	- / 2	6 / 3
s3	-	3	1,2,4	-
s4	3 / 2,3	-	1,2 / 1	-
s5	- / 4	-	2	1
s6	1	4	2 / -	- / 2
s7	- / 4	3	2 / 1,2	-
s8	-	2,3	1	-
s9	-	-	1,4	2,3
s10	- / 4	3	1	- / 2

数を表し，カンマ（,）は複数のプロトコルが共有されたことを表す．また，スラッシュ(/)は試行毎に別のプロトコルへ変遷したことを表す．

また，図 7 に，試行毎における各被験者の方向正答率の平均値を示す．図 7 より，第 1 試行よりも第 2 試行の方が，全体として方向正答率が改善されていることがうかがえる．特に特徴的であった s3 の試行毎の方向正答率の時系列変化を図 8 に示す．

s3 は第 1 試行において，方向正答率は大きく上下しているが，次第に増加する方向に変化している．一方で第 2 試行においては，方向正答値はそれほど変化せず，ある一定範囲で遷移する．これは，プロトコルが第 1 試行の段階で被験者と学習モデルに共有され，第 2 試行では既に共有された状態で試行が進行したためである．このことは表 2 において s3 のプロトコルが変動していない点からも裏付けられる．

表 2 より各被験者はそれぞれオリジナルのプロトコルを共有していたことから，学習モデルが人に適応していることが示唆される．

6.まとめ

本稿では，リテラシーフリーな「コンコン」インタフェースの実現のために，まず Sociable Things を介した WOZ 実験を行い，人同士の間の相互適応の過程を観察した．次にこの実験から知見を基にして，Sociable Dining Table の学習モデルについて必要な要素について考察し，学習モデルの構築を行った．さらに，ここで構築した学習モデルにより人との相互行為による検証実験を行った．実験の結果から，今回構築した学習モデルは，人のノックに対して Sociable Things の振る舞いを適応させることができたといえる．また，人も Sociable Things を参照しながら，ノックを変化させ，適応していた様子が観察され，関わりのなかからプロトコルを共有するという相相互適応学習を一部実現できたと考えられる．

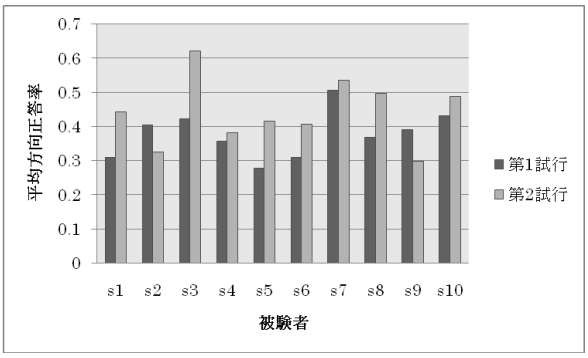

図 7：試行毎における平均方向正答率

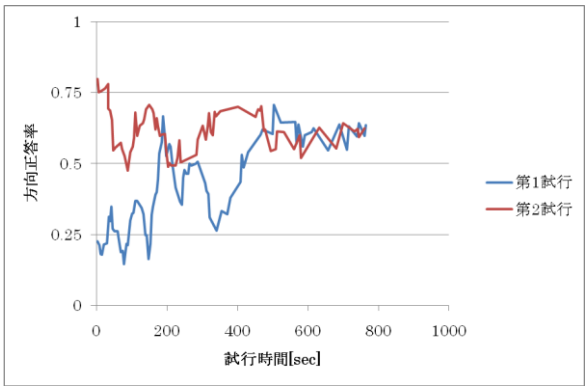

図 8：s3 の方向正答率の時間変化

今後は，構築した学習モデルを基に，相互行為をしあう中で行為の意味を獲得することや，自身で行為を分化させるような，より自律的な学習モデルの構築を行い，リテラシーフリーな「コンコン」インタフェースの実現を目指したい．

謝辞

研究の一部は，科研費補助金(挑戦的萌芽研究 19650044，および基盤研究(B) 21300083)によって行われている．

参考文献

[1] 岡田美智男，松本信義，塩瀬隆之，藤井洋之，李銘義，三嶋博之：ロボットとのコミュニケーションにおけるミニマルデザイン，ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, N0.2, pp.189-197,(2006)

[2] 吉池佑太, 岡田美智男：ソーシャルな存在とは何か―Sociable PC に対する同型性の帰属傾向について，電子情報通信学会論文誌 Vol.J92-A, No.11,(2009)

[3] 小松孝徳，鈴木健太郎，植田一博，開一夫，岡夏樹：パラ言語情報を利用した相互適応的な意味獲得プロセスの実験的分析，認知科学，Vol.10，No.1，pp. 121-138,(2003)