

チームコミュニケーションのシミュレーション

Modeling and Simulation of Team Communication

菅野 太郎¹ 島田 哲朗² 古田 一雄¹

Taro KANNO¹, Tetsuro SHIMADA², and Kazuo FURUTA¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

¹Dept. of Systems Innovation, School of Eng. The University of Tokyo

² 東京大学工学部システム創成学科

² Dept. of Systems Innovation, School of Eng. The University of Tokyo

Abstract: This paper presents the modeling and simulation of human-human interaction based on a concept of mutual beliefs, aiming to describe and investigate the cognitive mechanism behind human interactions that is a crucial factor for human system design and assessment. The proposed model captures four important aspects of human interactions: beliefs structure, mental states and cognitive components, cognitive and belief inference processes, and meta-cognitive manipulations. This model was implemented with a Bayesian belief network and some test simulations were carried out. Results showed that some basic qualitative characteristics of human interactions as well as the effectiveness of mutual beliefs were well simulated. The paper concludes by discussing the possibility of the application of this model and simulation to systems design and assessment.

緒言

チームは組織や社会を効率的に機能させるために一般的に用いられるヒューマンシステムの一形態である。チームにはワークロードの分散や外乱に対する冗長性、問題発見・解決における創発性等の利点が期待できる一方で、過信や齟齬、集団浅慮等による負の効果も存在する。ゆえに、より効率的に高パフォーマンスなチームを実現するためにチームやそのマネジメント、教育・訓練をデザインすることやその基礎となる知見を蓄積することはあらゆる組織、社会に共通する要求である。チームのヒューマンファクタに関する研究ではチーム協調におけるコミュニケーションの重要性が指摘されており、パフォーマンスに相関する様々なコミュニケーション形態や内容、指標が報告されている[1,2]。しかしながら、それらを説明する十分な理論は確立されておらず、チームデザイのための体系的な知見の提供には至っていない。さらに実践的なチーム協調への応用を志向した ecological validity が高かつ統制された実験の設計は難しく、そのための方法論も確立されていない。

そこで本稿では、チームコミュニケーションの生成を説明する理論モデルの構築と、モデルを用いた計算機シミュレーションによるチームコミュニケーションメカニズムの解明の試みについて紹介する。すなわち、どのような情報からどのような知識を生成し、どのようにメンバー間で共有するか、それをどのように測るかという、ヒューマンシステムのコ

ンテキストにおける情報・知識の創成と流れに関する理論・シミュレーションについて紹介する。次節ではまず、相互信念の概念を用いたチーム認知モデルを紹介するとともに、協調タスク遂行時における人同士のコミュニケーションパターンを追加した拡張チーム認知モデルについて説明する。3節では、ベイジアンネットワークを用いた拡張モデルの実装について説明し、4、5節で二人組の協調行動を想定したインタラクション（コミュニケーション）生成の計算機シミュレーションの例を示す。6節で本稿をまとめる。

チーム認知モデル

発達心理学における心の理論[3]や、哲学における協調行動における意図[4,5]に関する議論、reflexivity モデル[6]、脳科学におけるミラーニューロンの発見等、これらの理論や生理学的知見が示す人間の認知行動の特質は人には再帰的に他人の心的状態を理解する仕組みが備わっているということである。我々はこのような心の再帰性を相互信念の概念を用いて人の様々な心的状態や認知プロセスに適用することで、図1に示すような協調行動における認知（チーム認知）の概念モデルを提案した。図1の各層は上から、1）主体となる（エージェント）の認知2）相手の認知に対する信念、3）相手の自分の認知に対する信念、をそれぞれ表しており、各層には状況認識（SA）や知識、メンタルモデル、感情といった様々な心的状態や認知的コンポーネントを

含み得る．1層目では知覚-状態認識-意図形成-行動といった認知プロセス，2，3層の信念層では信念を獲得するための推論プロセスがあり，また，各層を参照・比較し，各プロセス・状態を修正，補完するといったメタ認知的操作も存在する．このモデルは上述の，1) 相互信念構造と2) 心的状態・認知コンポーネント，3) 認知・推論プロセス，4) メタ認知操作，から構成され，これらの各状態，プロセスの結果を基にインタラクションが駆動される様を記述する．

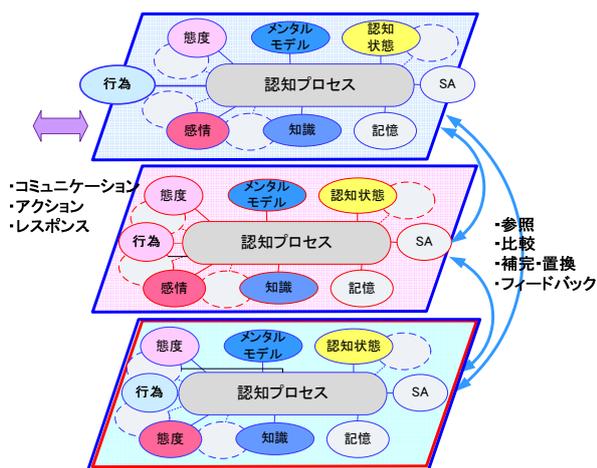


図1 チーム認知モデル

コミュニケーションジェノタイプ

本節ではコミュニケーションの生成機構について説明する．発話内容や発話の機能（遂行動詞）といった観察可能な要素とそれを発する理由・原因，機構となる観察できない要素を区別することは有益である．本研究ではそれぞれコミュニケーション Phenotype, Genotype と呼ぶ概念図を図2に示す．上二段が Phenotype，下二段が Genotype にあたる．例えば，何についてどのように表現したか（発話内容）や，どう伝え相手に働きかけたかという発話の機能は Phenotype に類される．Genotype には Phenotype に至った理由やそのための認知プロセス，それを支える脳のメカニズムや，パースペクティブテイキングといった様々な協調装置[7]が類される．従来，人間同士のインタラクションやヒューマンマシン研究における発話・会話分析や振舞い分析は上二段を主に扱うもので Genotype を分析するためには別途実験後のインタビューや生理実験といった他の手法が必要となる．先行研究で二人組チームによるチーム協調実験を行い Genotype の整理を行った．実験中のビデオ・音声記録を行い，さらに実験後に実験中のビデオを被験者に見せ，コミュニケーションの背後にある理由を相互信念の観点から説明させたり，観察者に背後理由を推論させたりすることでコミュニケーション Genotype の抽出・分類を行った[8]．結果を表1に示す．

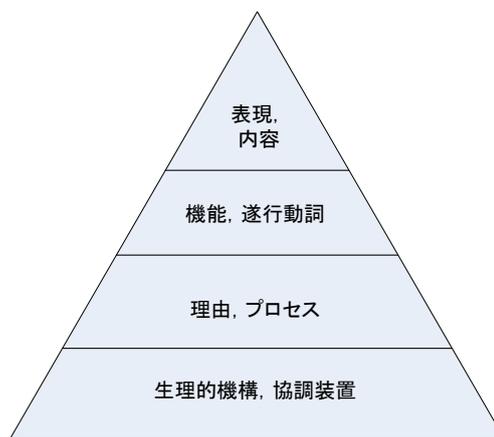


図2 コミュニケーションにおける Phenotype と Genotype

表1 コミュニケーション Genotype

Genotype		Phenotype (遂行動詞)
分類	理由	
1. 自身の認知プロセスや相手の心的状態・プロセスの推論のため	- 必要・十分な情報や知識がない - 相手の心的状態・プロセスの推定に自信がない，等	Query Confirm
2. 相手の認知プロセスや推論プロセスを助けるため	- とにかく共有しておく - 相手が必要・十分な情報がない - 前もって情報を提供しておく，等	Inform
3. 相手の認知プロセスや推論を修正するため	- 齟齬の回避・回復 - 誤解の訂正，等	Inform Query Confirm

シミュレーションモデル

本節ではチーム認知の概念モデルを計算機モデルとして実装する方法について説明する．

認知・推論プロセスと知識モデル

不確かで限定的な情報に基づく状況認識における人間の認知・推論を扱うために，本研究では認知・推論プロセス，つまり提案モデルの各層をベイジアンネットワーク(BBN)を用いて実装した．後述するシミュレーションでは，状況認識に関する認知・推論プロセスを用いた．BBNの各ノードは観測可能な兆候および構成機器の状態（に関する認知・推論）を，リンクはノード間の因果関係を表している．各ノードの持つ確率は事象生起に対する確信度を表し，これによって確率値で認知・推論プロセスを定量的

に扱うことができる．意識的に事象生起を認識しているノードの集合を U とし以下の式で与える．ここで P_i は事象 i への確信度を， T は「生起認識」のための確信度の閾値を表している．

BBN のネットワーク構造，ノード間の条件付き確率分布，ノード事象の事前確率分布の 3 つの要素を各主体（エージェント）が持つ知識とみなすことができる．シミュレーションでは，これらの要素をエージェント個別に定義することで知識の非対称性を表現した．シミュレーションでは，知覚やコミュニケーションから得られる入力情報や層間の相互作用によってこの確信度を操作し，推論を行うことで，各層の認知プロセスを模擬する．

$$U = \sum_i \{i | P_i \geq T\} \quad (1)$$

層間相互作用

自分の認知プロセスと相手の認知プロセス・状態に関する推論が独立して行われているとは考えにくい．2 節で説明したように，各プロセスの結果を参照，比較するといったメタ認知的操作を通じた認知・推論結果の修正や，無意識的に自身の認知と推論結果と置き換える（例えば自分が見たものを相手も見たとの思い込む，またはその逆（補完）など）といった効果もあると考えられる．このような層間の相互作用も各 BBN の対象ノードの確信度の値を以下のように操作することによって模擬する．

思い込み： $P_i = P_i + \Delta P_i$ (ΔP_i は影響度) (2)

補完： $P_i = P_i - \Delta P_i$ (ΔP_i は影響度) (3)

コミュニケーション生成

表 1 に示すように過去の実験からインタラクション Genotype として 3 パターンが確認された．本研究ではそのうち表 1 の分類 3 の Genotype を実装した．すなわち，各層の生起認識事象の集合をそれぞれ U_1, U_2, U_3 とすると，これらの比較によってコミュニケーションを生成させる．コミュニケーション生成ルールを以下に示す．(4)は自身の 1 層と 2 層目の生起認識事象が異なり相手の認知が間違っていると考えられる場合は，自身の認識事象を伝達することで相手の 1 層目の修正を試みることを表し，(5)は相手の自分に対する信念が誤っていると考えられる場合は，自身の認識事象を伝達することで相手の 2 層目の修正を試みることを表す．

If $U_1 \neq U_2$ and
 If U_2 is believed to be false then Inform(U_1) to Modify(U_{b1}).
 If U_1 is believed to be false then Correct(U_1) based on U_2 . (4)

If $U_1 \neq U_3$ then Inform(U_1) to Modify(U_{b2}) (5)

シミュレーション

二対のエージェント A, B による外部状況認識の共有プロセスを例題に挙げ，各エージェントが持つ特性とモデルに基づくコミュニケーションによってチーム認知（状況認識共有）がどのように変化するかをシミュレートした．

BBN の各ノードは観測可能な徴候ノードと徴候から同定される状態を表わすノードから構成され，それぞれ事前確率並びにノード間の条件付き確率が付与されている．本シミュレーションで用いた各 BBN は具体的な状況認識のコンテキストを表現したのではなく徴候 - 状態からなる抽象的コンテキストを表わすものであるが，ヒューマンモデリングの手法を用いて具体的な状況判断モデルを構築することは可能である[9]．9 つのノードを観察可能な徴候ノードと設定し，徴候ノードに関する情報をコミュニケーションで伝達しあうものとした．徴候の観察パターンはエージェント毎にシナリオベースで記述し，各エージェントが断片的に情報を収集しながら互いにコミュニケーションを行うことで，二者間の共有状況認識が醸成されていく様を模擬する．

知識モデルの実装

エージェント A, B の知識は非対称とし，A (B) のみが保持する知識と，A, B が共に保持している知識を図 3 のように実装した．図 3 はエージェント A の一層目の BBN を表わしている．左四角で囲まれたノード群はエージェント A のみが保持する知識を，右側の四角で囲まれた単一ノードは B のみが持つ知識（ノード群）に相当するノードを表わしている．エージェント B にはこの単一ノードに関する知識が複数のノードから詳細に表現されており，エージェント間の知識の非対称が実現されている．

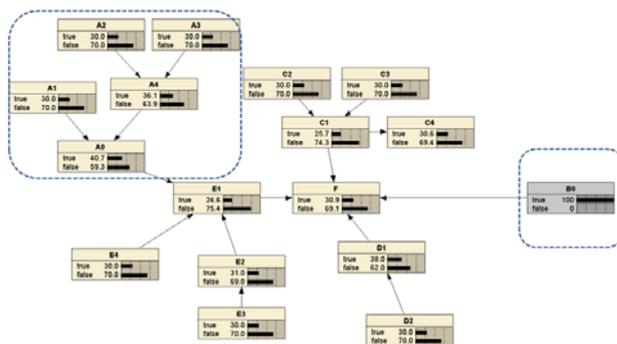


図 3 知識の非対称性の実装

エージェントの性格

式(4)において，自身の 1 層目と 2 層目のどちらにより信頼を置くかの傾向をエージェントの性格と定義し，表 2 に示すような 4 つの性格を実装した．

表 2 エージェントの性格

Type	Character	Description
C	Strong self-confidence	常に自分(の 1 層目)が正しいと信じる
F	Following blindly	常に相手(自分の 2 層目)が正しいと信じる
B	Balanced	より詳細な知識を持っている方を信じる

評価指標

コミュニケーションの評価は状況認識の共有の程度で測る。相互信念を導入した場合、様々な共有の定義が可能となる [10]。本研究では、i) 正解度 (correctness)：各エージェントの状況認識 (1 層目) の正しさの平均 (各個人が実際に起こっている状況をどの程度正しく認識しているか) と、ii) 共有度 (sharedness)：相手の状況認識に対する信念の実際の相手の状況認識に対する網羅性と一致度の平均で評価する。正解度と共有度は以下の式(6), (7)で表わされる。U_{xn} は、エージェント x の n 層目の「生起認識」集合を表す。また、U₀ は実際に生起している事象の集合を表す。

$$\text{正解度} = \left\{ \frac{U_{a1} \cap U_0}{U_0} + \frac{U_{b1} \cap U_0}{U_0} \right\} \times 1/2 \quad (6)$$

$$\text{共有度} = \sum_{a,b} \left\{ \frac{U_{self2} \cap U_{partner1}}{U_{partner1}} + \frac{U_{partner1} \cap U_{self2}}{U_{self2}} \right\} \times 1/2 \quad (7)$$

シミュレーション設定

シミュレーション設定の概要を表 3 に示す。シミュレーションは 50 ステップからなり、シナリオに記述された環境情報の変化を各エージェントが行動シナリオに記述されたタイミングで獲得し、状況認識や推論を行う。必要に応じてコミュニケーションを行いエージェント間で情報を交換する。シミュレーションは各設定で 50 試行を行い正解度、共有度の平均をとった。

表 3 シミュレーション設定

シナリオ (50 ステップ)
内容：2 対のエージェント (Agent A, B) による状況認識の共有プロセス
環境シナリオ：知覚可能な状況の変化を記述 (微候 15 ノードに対応)
行動シナリオ：各エージェントの情報獲得のタイミングとどの情報を獲得するかを記述
パラメータ
BBN：各層のネットワーク構造と確率テーブル
層間の影響度 (,)：思いこみと補完
状態認識の閾値 (T)：ある状態が生起している

と認識するのに必要な信念確率
エラー率：獲得情報を誤って解釈する確率 (0.0-1.0)
コミュニケーション率：情報共有を行う頻度 (0.0-1.0)
結果
正解度と共有度 (50 試行の平均)

結果と考察

三層目の有無の比較

パートナーが自分に対してどのような信念を抱いているかを考慮できることは他人と協調・協力する上で重要な能力であると予想される。そこで三層目の有無による正解度、共有度の違いを比較した。図 4 はエラー率による正解度 (右段) と共有度 (左段) の変化を示している。各段は上からコミュニケーション率がそれぞれ 0.1, 0.3, 0.5 の条件での結果を示している。

図 4 から相手が自分に対してどのような信念を抱いているかを考慮できる (三層目有り) 場合、コミュニケーションの多少にかかわらず正解度、共有度ともに高い結果が得られることが分かった。エラー率別の結果からも、三層目がある場合が大凡常に正解度、共有度が高いことが示された。

被験者実験等でこれらの傾向の妥当性を検証することは困難だが、シミュレーションから得られた結果は予想に合致するものであり、チーム協調に対する対人信念の寄与に関するナイーブな理解に矛盾するものではない。

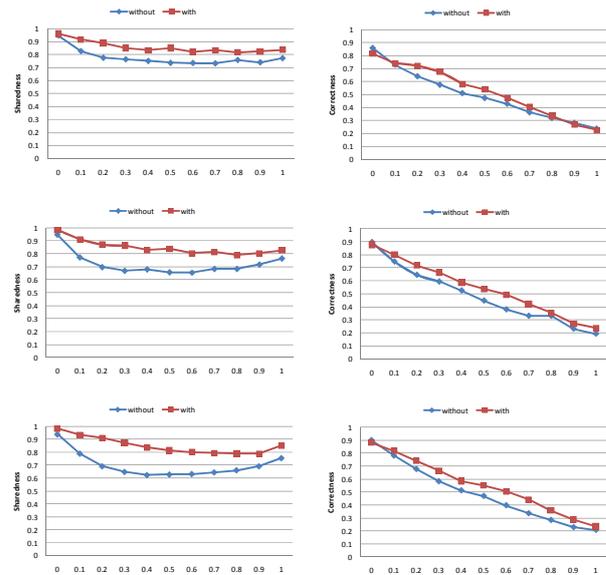


図 4 三層目の有無による正解度、共有度比較

チーム構成による比較

表 2 に示した性格による異なるチーム構成によっ

て正解度、共有度の比較を行った結果を図5に示す。他人に同調する二人の組合せ（FF）では正解度が低くなる傾向が観察された。またコミュニケーションの効果을調べるために、全く同じ設定でコミュニケーションを行う場合とコミュニケーションを全く行わない場合の正解度の差をチーム別に比較した。差が0以上のときはコミュニケーションがチームパフォーマンスに寄与したことを、0未満はコミュニケーションが負に作用したことを意味する。結果を図6に示す。横軸はシミュレーションステップを表わしている。図6から他人に同調する二人組ではコミュニケーションを行うことによってかえってチーム全体のパフォーマンス（正解度）が下がる可能性があることが示唆された。

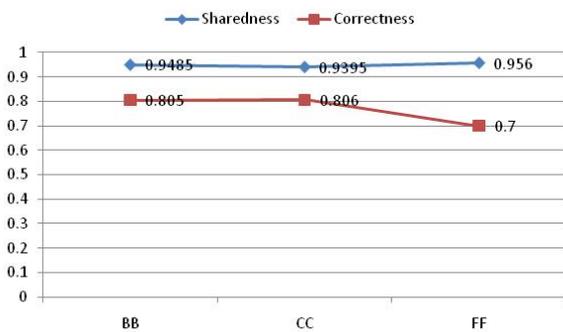


図5 性格別チーム構成による共有度、正解度の比較



図6 コミュニケーションの効果

結言

本稿ではヒューマンシステムの基礎となる二人組のチームにおけるコミュニケーション生成のモデリングと計算機シミュレーションについて紹介した。外部から得られる情報が同じでもそこで生成する情報やどのような動機でコミュニケーションし情報を共有するかによってチームの状況認識の程度が左右されることがシミュレーション結果から示された。

計算機シミュレーションを用いることで、フィールドワークや実験では統制できない要素を統制したり、さまざまな仮定や状況をテストしたりすることが可能となる。計算機シミュレーションを相補的に

用いることでヒューマンシステムデザインに関するより詳細で有益な知見の獲得が可能になることが期待できる。

謝辞

本研究の一部は財団法人日産科学振興財団の助成による。

参考文献

- [1] Bowers C.A., Jentsch F., Salas E., and Braun C.C., Analyzing Communication Sequences for Team Training Needs Assessment, *Human Factors* 40, pp.672-679 (1998)
- [2] Serfaty D., Entin E.E., and Johnston J., Team Coordination Training; in *Making Decision Under Stress*, American Psychological Association (1998)
- [3] S. Baron-Cohen, *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*, MIT Press (1995)
- [4] Tuomela R. and Miller K., We-intentions, *Philosophical Studies*, Vol.53, pp.367-389 (1987)
- [5] Bratman M.E., Shared Cooperative Activity, *the Philosophical Review*,101, pp.327-341 (1992)
- [6] Lefebvre A.V. *Research on Bipolarity and Reflexivity*, The Edwin Mellen Press (1992)
- [7] Malle F.B. and Hodges D. S., *Other Minds*, the Guilford Press (2007)
- [8] Kitahara Y., Hope T., Kanno T., and Furuta K., Developing an understanding of genotypes in studies of shared intention, *Proc. 2nd Int. Conf. Applied Human Factors and Ergonomics*, CD-ROM (2008)
- [9] 畠山, 古田, ベイジアンネットワークを用いたオペレータの意図推論手法, *ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集*, 3123 CD-ROM (2004)
- [10] Kanno T., the Notion of Sharedness based on Mutual Belief, *Proc. 12th. Int. Conf. Human-Computer Interaction*, pp.1347-1351(2007)