

ベイジアンネットワークを利用した主観的経験と社会的経験の表現と蓄積

-xtel ワークショップからのベイジアンネットワーク適応への考察-

To Represent Subjective Experience and Social Experience with Bayesian Networks

白鳥 成彦^{*1}

Naruhiko Shiratori

奥出 直人^{*2}

Naohito Okude

^{*} 慶應義塾大学 政策・メディア研究科^{*2} 慶應義塾大学 環境情報学部

Graduate school of Media and Governance
Keio University

Graduate school of Media Design,
Keio University

This research shows how to use a distributed bayesian networks to represent user's subjective experience and user's social experience and goals. To represent the subjective experience, the networks accumulate the information and data from some sensors with individual actions. In the result, the networks can represent user's individual action and to give the suitable effect to the user. the research uses and analyzes the data from the xtel workshop and offers the networks model.

1. はじめに

ベイジアンネットワークを拡張して主観的経験と社会的経験の表現を行うことは、個人や社会に対してシステムが適切に解を与えることができる今までにないアーキテクチャの鍵である。本研究では個人の主観的な行為や経験を個人ごとに分割したベイジアンネットワークにより表現し、さらにそのベイジアンネットワークを複数個組み合わせることで、社会的な行為の蓄積を表現するための手法を提案する。今回は xtel ワークショップでの事例を基にして、センサーやアクチュエータを用いたコンテンツをデザインする事例の中でどのような主観的経験と社会的経験の表現が必要かどうかの要求を導き出していく。さらに、コンテンツにおける要求事例を複数のベイジアンネットワークを用いて解決し、主観的経験と社会的経験の表現が可能になるのかを探っていく。

本研究では、個人の主観的な経験や行為を計算し、適切な解を提供するシステムをベイズ理論を用いて構築していく。今回のシステムでは、この主観的行為を計算するためにベイズ理論をネットワーク上の中で複数組み合わせ合わせたベイジアンネットワークを利用していく[Pearl 2000]。ベイズ理論とはイギリスの数学者であるトーマス・ベイズが提唱した数学と確率に関する理論で、人間の主観的な行為を確率の積として定義することができ、観測されたデータに対して、元々持っていた仮説の確率をアップデートすることができるモデルである。ベイジアンネットワークはベイズ理論を複数使い、ネットワーク上で処理することで、専門家の主観的な勘や行為を複数因果関係の連鎖として表現することができるモデルであり、1980年代後半から90年代前半にかけて Judea Pearl 達によって提唱された[Pearl 1988, 2000]。ベイジアンネットワークを用いたシステムを構築することで、個人の主観的な知識や経験を表現し、状況に合わせた行為の指示をシステムから提供することができるため、よりコンテンツに即したコンテンツを制作することが可能にある。

今回のベイジアンネットワークを用いたシステムはオペレーションデータに対して主観的確率を用いて処理をしたものである。オペレーションデータとは、ユーザーが行為の中で意識していないデータであり、システムに対する入力であるセンサー値を表し、このデータをモデル内で利用するために活動理論と主

観的確率論を利用していく。活動理論とは、ロシアの発達心理学者であるヴィゴツキーやレオンチェフたちによって提案されたもので、人の集団的な振る舞いを記述するための理論であり、多数ある個人の行為を層状に分類することができる[Nardi 1995]。また、主観的確率論とは、物事が出る頻度を示す確率値を人間の思いの程度として表していくための理論群[Gillies 2000]であり、ベイジアンネットワークモデルとして利用していくことで個人の不確実な行為や経験を表現することができる。本研究では、主観的確率とオペレーションデータを用いた複数個のベイジアンネットワークモデルをコンテンツのデザインに利用する。

複数個のベイジアンネットワークは、活動理論に従って活動：アクティビティ(全体のゴールを表す)、行為：アクション(ゴールを満たす実際の行為を表す)、操作：オペレーション(行為を満たす、無意識的な行為を表す)に応じて構築される。抽象度が高いものから、アクティビティベイジアンネットワーク、アクションベイジアンネットワーク、オペレーションベイジアンネットワークとし、それぞれを層状に配置し、統合している。この3種のベイジアンネットワークの中では個人ごとの主観的経験を表すために中間層のアクションベイジアンネットワーク、センサー値等のインプット情報を処理するために最下層のオペレーションベイジアンネットワーク、統合した社会的経験を表し、コンテンツのアウトプット部分を表現するためにアクティビティベイジアンネットワークを用いていく。以上の3層に分割したベイジアンネットワークを組み合わせることで個人の主観的経験と社会的経験を同時に表現することが可能になる。

第2章では、コンテンツにおける主観的経験と社会的経験を表現する必要性を xtel ワークショップの事例から述べていく。第3章では、第2章で提示した主観的経験と社会的経験の問題点をベイジアンネットワークを用いて解決していく手法を提案する。第4章では今回のモデルの特徴と問題点を探り、今後の展開を述べる。

2. 主観的経験と社会的経験

この章では、xtel ワークショップの事例の中で主観的経験、行為と社会的経験、行為を紹介していく。なお、今回採用している xtel ワークショップとは独立行政法人科学技術振興機構(JST)・戦略的創造研究推進事業(CREST)の支援のもと開発しているユビキタスコンテンツ・プラットフォーム xtel を利用して、コンテン

ツを迅速に開発することを体験してもらおうべく 2007 年 9 月 13 日に慶應義塾大学三田キャンパスにて行われたものである。

2.1 xtel ワークショップにおけるコンテンツ

xtel とは複数のセンサーとアクチュエータを統合させ、迅速にコンテンツを開発することができるプラットフォームである。今回のワークショップでは 5 人から 7 人のグループで xtel を用いたコンテンツを 4 時間で制作してもらった。

例えば、以下の写真で示されているコンテンツは愛のせんぷうきと名づけられたコンテンツである。このコンテンツでは、扇風機の前で 2 人がダンスを行い、そのダンスの動きが同一になると前の扇風機が回り、二人に風が送られるというものである。二人の腰にはそれぞれ加速度センサーが付けられ、上下と左右の動きがシンクロすることで前の扇風機のスイッチがオンになるというものである。この場合はインプット情報が加速度センサーの値であり、アウトプットが風を送るというアクチュエータである扇風機の On/Off である。

2.2 コンテンツにおける主観的経験と社会的経験

主観的経験とは、客観的データから帰納的に表すことができない主観的にきめている経験や行為のことを指す。また、社会的経験、行為とは複数人の行為に基づいて行われる 2 次的な経験や行為をさす。通常、ベイジアンネットワークを構築するためには母集団から帰納的にリンクと確率を決定している。

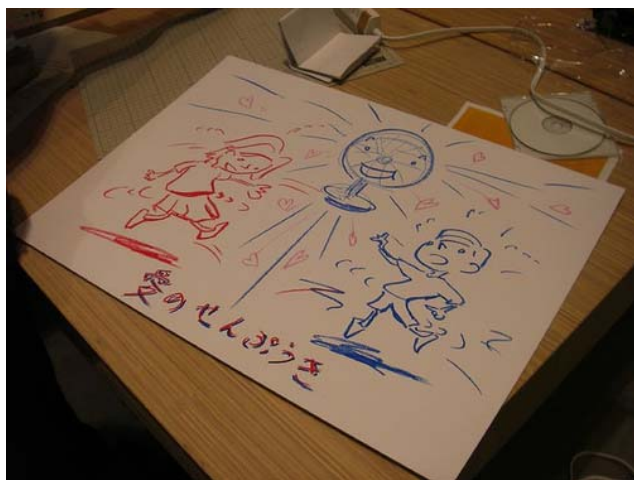
センブウキのコンテンツの場合には主観的行為、経験とはある個人がダンスをする動きであり、ダンスが気持ち良いやこの動きが自分の最高の動きであるという個人やコンテキストごとに変化するものである。また、このコンテンツにおける社会的行為、経験とは二人のダンスがシンクロすることであり、そのシンクロによって扇風機が回るということである。

このコンテンツにおける主観的な行為や経験は、個人によって違う。例えば、腰につけた加速度センサーから同じセンサー値を出力されていたとしても、初心者としては軽快に踊っていると感じることもあるだろうし、熟達者では調子が良くないと感じることもある。このように経験やその場の状況に応じて主観的経験や行為は違うものである。

次に、社会的経験は個別の主観的経験の蓄積によって変化してくる。例えば、センブウキのコンテンツの場合には二人の個別の動きがシンクロするということをしており、相手が快適に踊っていて、かつ自分が快適に踊っていたときにシンクロするということになる。相手の快適さと個人の快適さは熟練度や経験によってことなるためにその個別の関係をこの社会的経験では吸収している。

また、主観的経験と社会的経験は一般的なコンテンツだけではなく、手術室における麻酔科医の行為という専門的な行為でも行われている。例えば、白鳥が 2007 年に指摘しているとおり、手術室における麻酔科医の行為は、専門的な経験をもとに手術室という複数人の社会の中で主観的に行為を決定している。

以上のコンテンツからの主観的行為と社会的行為の要求を



整理すると下記になる。

主観的行為は下記になる。

- 個人によって異なる
- コンテキストや状況に応じて変化する(動的特性)

社会的行為の要求は下記になる

- 個人同士の連携を表現する

3. ベイジアンネットワークによる表現

本章では、第 2 章で提示した要求を満たす表現手法として層状に重ねたベイジアンネットワークを提案していく。

ベイジアンネットワークは、ノードとノード間を結ぶアーク、ノード間の条件付確率を決定することで、観察した結果後の事後確率を求めていくことができるネットワークモデルである。ベイジアンネットワークでは観察することができる状態をノードとして表現し、状態間のつながりを確率として表現することが可能になる。不確実なドメインにおいて分かっている部分だけを表現し、分からない部分、不確実な部分は不確実なまま表現することができるのである。この不確実性の特徴によってベイジアンネットワークを用いた表現手法はウェブサービス、中国医療、獣医診断などさまざまなドメインで展開されている。例えば、Geenen 達は豚コレラにおける獣医療診断支援システムにおいてベイジアンネットワークを利用している。豚コレラ診断の専門医からのインタビューから知識を獲得し、診断におけるベイジアンネットワークを構築したのである。[Geenen 2005]このように、ベイジアンネットワークは不確実な状態を確率と状態変数を用いて不確実なままモデリングできるためにさまざまな分野で適応されている。

以上のベイジアンネットワークを用いて、個別の主観的行為を表現していく。さらに、その主観的行為にセンサー値を入力するための別のベイジアンネットワークを構築する。さらに、社会的行為を表現するために別のベイジアンネットワークを構築する。以上 3 つの種類のベイジアンネットワークを層状に重ね合わせたものとしてベイジアンネットワークレイヤーモデルを採用する。

提示されるベイジアンネットワークレイヤー (BNL) は上の層から社会的経験を表現するアクティビティベイジアンネットワークモデル、個別の主観的行為を表現するアクションベイジアンネットワークモデル、センサー値を処理するオペレーションベイジアンネットワークモデルという 3 種類の抽象度が違うベイジアンネットワークを統合したモデルとなっている。[Shiratori, 2007]

アクティビティベイジアンネットワークとはシステムを利用する人の社会的経験や目的を表すベイジアンネットワークである。アクティビティベイジアンネットワークはそれぞれのユーザーの目的を表現するアクティビティノードと下層のアクションベイジアンネットワークとのインタフェースであるアクションノードの 2 種類で構成される。アクティビティノードでは個人間の関係を表すものである。例えば、センブウキの事例では、二人の関係やセンブウキが回るということを表現する。さらに、アクティビティベイジアンネットワーク内には、アクションベイジアンネットワークからの個人ごとの主観的経験、行為の結果を表現するアクションノードが構築されている。このアクションノードの確率を入力としてアクティビティベイジアンネットワーク内の確率はアップデートされる。このようにアクティビティベイジアンネットワークでは、各個人の状態、目的を表現するアクティビティノードとアクションベイジアンネットワークとのインタフェースであるアクションノードによって構成される。

次層のアクションベイジアンネットワークモデルとはアクティビティモデルで表現された目的を達成するために行う個人の行為を表すモデルであり、それぞれのアクターの行為状態をダイナミックベイジアンネットワークとして表現していく。アクションベイジ

アンネットワークはユーザーの行為を表す行為ノードと共に、アクションベイジアンネットワークの結果を表すアクションノード、センサーのインプット結果を表現するオペレーションノードという3種類のノードによって構成される。行為ノードとは個人の主観的な表現を個人ごとに表したものである。次のアクションノードとはアクションベイジアンネットワークと上層のアクティビティベイジアンネットワーク間のインタフェースの役割を果たすノードであり、行為ノードの最終的結果を上層のアクティビティベイジアンネットワークに出力する。最後のオペレーションノードとはアクションベイジアンネットワークと下層のオペレーションベイジアンネットワーク間のインタフェースの役割を果たすノードであり、オペレーションベイジアンネットワークで導かれるセンサーの状態の結果を表現するノードである。このようにアクションベイジアンネットワークでオペレーションノードの確率を入力としてアクションベイジアンネットワーク内の確率をアップデートし、出てきた行為ノードの結果をアクションノードの確率値として上層のアクティビティベイジアンネットワークに出力している。

3層目のオペレーションベイジアンネットワークでは、インプット情報をつかさどるセンサー等の機器の状態を表現している。コンテンツごとに異なるセンサー機器からのアウトプットを表現するアウトプットノードとアクションベイジアンネットワークへのインタフェースであるオペレーションノードによって構成される。例えば、アウトプットノードは加速度センサーからの値を表現するノードや、タグ情報等であり、インプット全般を表現している。さらに、オペレーションベイジアンネットワーク内にはオペレーションノードが設定されており、上層のアクションベイジアンネットワーク内に存在するオペレーションノードと同期している。オペレーションノードではアウトプットノードを通じた推論結果をアクションノードに出力する。このようにオペレーションベイジアンネットワークでは、それぞれのアウトプットノードの確率を観測値としてオペレーションノードの事後確率が決定され、その確率をアクションベイジアンネットワークに出力している。

以上のアクティビティベイジアンネットワーク、アクションベイジアンネットワーク、オペレーションベイジアンネットワークという抽象度が異なった3種類のベイジアンネットワークを層状に重ね、それぞれの層をアクションノード、オペレーションノードで構成されるインタフェースノードで統合したものがベイジアンネットワークレイヤーモデルである。

このBNLモデルを利用することで主観的経験はオペレーションベイジアンネットワークとアクションベイジアンネットワークの融合によって表現され、社会的経験はアクティビティベイジアンネットワークによって表現される。

このように層状に構築することでコンテキストや経験に応じた柔軟な変更が可能になる。個別の主観的経験を表現する場合はアクションベイジアンネットワークのみを変更するだけにとどまる。さらに、個人同士の関係を変更する場合もアクティビティベイジアンネットワークのみを変更するにとどまる。

4. ベイジアンネットワークの実装

4.1 ベイジアンネットワークの実装

上記のBNLモデルを実装する際には、レイヤー間の通信を表現する並列コンピュータシステムと、それぞれのベイジアンネットワークモデルを表現するXMLとC#プログラムの統合によって行う。それぞれのレイヤー間の通信を行う実装モデルでは、それぞれのレイヤーにおいて分散させ、並列処理を行うコンピュータシステムとして構築する。各レイヤーモデルを一つのコンピュータ内のXMLプログラムとC#プログラムの統合によって表

現する。次に、それぞれのレイヤーモデルを表現したコンピュータシステムをMPIというクラスタリングプログラムによって統合する。レイヤー間の通信は頻繁に通信を行い、それぞれの負荷がかかるために並列コンピュータシステムとして実装する。

それぞれのレイヤーモデルは、すべてのベイジアンネットワーク情報を示したXMLプログラムとベイジアンネットワーク内の推論を表現するC#プログラムの統合によって実装する。XML内では、状態を表現するノード要素と、ノード間のリンクと確率値を表すリンク要素で構築される。そのXMLプログラムをC#側で読み込み、ノード要素とリンク要素を一つのクラスとして表現し、確率値をクラスの変数値として表現します。C#プログラムでは証拠に基づく、確率値の変化を表すプログラミングが実装され、観察に基づいた確率値の変動を表現する。XMLプログラムとC#プログラムの連結によりそれぞれ個別レイヤーのベイジアンネットワークモデルは実装されている。

このように、並列コンピュータシステムとXML、C#を用いたベイジアンネットワークレイヤーモデルの統合によってBNLモデルは実装される。

4.2 課題

提案するベイジアンネットワークレイヤーモデルは表現の柔軟性には有効だが、その有効性のためにシステム自体が複雑になってしまう問題があげられる。目的である事後確率を求めるために、複数のベイジアンネットワークを用いるために、妥当な推論結果、事後確率を求めるために通常のベイジアンネットワークよりコンピュータ負荷がかかり、推論時間も余計にかかってしまう。例えば、1つのコンピュータ内でシステムを構築する差異には、アクティビティベイジアンネットワーク1つ、アクションベイジアンネットワーク1つ、オペレーションベイジアンネットワーク1つという最低3つのマルチスレッド処理が必要になってくる。このような表現力の柔軟性とコンピュータ負荷のバランスを決定していくことが今研究の今後の課題である。

5. まとめ

本研究では主観的経験と社会的経験の条件をワークショップのコンテンツから述べ、ベイジアンネットワークレイヤーモデルを用いてそれらの表現を行った。

今後の展開としては、今回構築した主観的経験と社会的経験を表現するベイジアンネットワークを実際にデザイナー、ユーザーが容易に変更でき、ベイジアンネットワークレイヤーモデルの実証実験ができる方法を動く形で検証を行っていく。

なお本研究は独立行政法人科学技術振興機構(JST)・戦略的創造研究推進事業(CREST)の支援のもと行われました。

参考文献

- [Pearl 2000] Pearl, Judea. 2000. *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Pearl 1988] Pearl, J. 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo, California: Morgan Kaufmann.
- [Nardi 1995] Nardi, Bonnie A., ed. 1995. *Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction*. Massachusetts Institute of Technology.
- [Gillies 2000] Gillies, Donald. 2000. *Philosophical theories of probability*. London/ New York: Routledge.

- [Castillo 1997] Castillo, Enrique, Jose Manuel Gutierrez, and Ali S. Hadi. *Expert Systems and Probabilistic Network Models*. Edited by David Gries and Fred B. Schneider, *Monographs in Computer Science*. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [Lucas 2004] Lucas, Peter J. F., Linda C. van der Gaag, and Ameen Abu-Hanna. "Bayesian Networks in Biomedicine and Health-Care." *Artificial Intelligence in Medicine* 30, no. 3: 201-14. 2004
- [Geenen 2005] Geenen, Petra L., and Linda C. van der Gaag. "Developing a Bayesian Network for Clinical Diagnosis in Veterinary Medicine: From the Individual to the Herd." In *the Third Bayesian Modelling Applications Workshop, held in conjunction with the Twenty-first Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. Edinburgh, 2005.
- [Shiratori 2007]Naruhiko Shiratori, Naohito Okude "Bayesian networks layer model to represent anesthetic practice", Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2007)
- [Russell 1995] Russell, Stuart J., and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2nd Edition ed: Prentice Hall, Inc., 1995.
- [Gustavo 2003] Gustavo, Arroyo-Figueroa, and L. Enrique Sucar. "Temporal Bayesian Network of Events for Fault Diagnosis and Prediction in Thermal Power Plants." In *the 1st Bayesian Modelling Applications Workshop, held in conjunction with the 19th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. Acapulco, Mexico, 2003.
- [Koller 1997] Koller, Daphne, and Avi Pfeffer. "Object-Oriented Bayesian Networks." Paper presented at the the Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-97), Providence, Rhode Island, August 1-3 1997.
- [Lerner 2002] Lerner, Uri N., B. Moses, M. Scott, S. Mcileraith, and D. Koller. "Monitoring a Complex Physical System Using a Hybrid Dynamic Bayes Net." Paper presented at the the 18th Annual Conference on Uncertainty in AI (UAI2002) 2002.