

麻酔行為を表現するベイジアンネットワークレイヤーモデルの構築

Bayesian Networks Layer Model to Represent Anesthetic Practice

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 Faculty of Environmental Information,
Keio University Keio University

This paper shows how to represent an anesthetic practice using bayesian networks layer model. There are three required points for representing anesthetic practice in operation room, which are multiple actors, dynamics, and uncertainty. Normally, some deterministic models, expert system models, are selected for representing knowledge of expert in medical domains. However, the model can not treat uncertainty and dynamics for anesthetic points. Bayesian networks and dynamic bayesian network are well known to represent uncertainty and are used in many domains. The bayesian network models, however, do not correspond to multiply dynamics, which is the point for anesthetic practice. In addition, object oriented bayesian network has good points for representing multidimensionality functions, but does not correspond to individual expression for each anesthetist. So, we propose bayesian networks layer model to challenge the problems for individual expression and multiply dynamics. The layered model integrates three kinds of bayesian network model to represent functions of anesthetic practice.

1. はじめに

本論文では手術室における動的で、多次元な麻酔科医の行為を表現するために、ベイジアンネットワークを3層に拡張したベイジアンネットワークレイヤーモデル(BNLモデル)を提案する。ベイジアンネットワークレイヤーモデルとは、ベイジアンネットワークを複数個、層状に統合したものである。複数個のベイジアンネットワークは、ロシアの発達心理学者たちが提案した活動理論における活動: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、ベイジアンネットワークレイヤーモデルではそれぞれを層状に配置し、統合している。

手術室における麻酔科医の行為は患者の状態を安全にするという目的のもと、複数の職種の間によって行われている。複数の職種の連携と患者状態の動的な変化のために、麻酔科医の行為は動的特性と多次元特性、不確実性を有するという特徴を持っている。この麻酔科医行為の特徴を表現するためには、通常のベイジアンネットワークやダイナミックベイジアンネットワークでは多次元性を有した表現力の柔軟性に問題があり、適切に麻酔科医の行為を表現できない。

BNLではこの表現力と再利用性の問題を解決するために、麻酔行為に即したベイジアンネットワークを3種類構築し、各ベイジアンネットワークを層状に統合することで麻酔行為の表現を行っていく。3種類のベイジアンネットワークの統合により、行為の目的、実際の行為、機器の観察結果を分けてベイジアンネットワークを構築することで、単一のベイジアンネットワークより個別の状況に応じて柔軟性のある表現が可能になり、ベイジアンネットワークの更新、ノードの追加、削除を簡潔に行うことができる。本論文では、現在までのベイジアンネットワークの表現事例を述べると共に、麻酔科医の行為表現におけるBNLを提案し

ていく。

第2章では、手術室における麻酔行為の特徴をあげ、本研究で取り扱う麻酔科医ドメインの背景と表現条件を述べる。3章では、医療におけるコンピュータシステムの事例と共に、現在までのベイジアンネットワークにおける表現事例と問題点を論じる。4章では、3章で述べた問題点をBNLモデルにおいて解決していくと共に、BNLモデルの特徴と問題点を論じていく。

2. 麻酔行為の特徴

この章では、今研究で表現する手術室において麻酔科医がとる行為の特徴を提示する。麻酔科医は手術室内において、患者における疾病や診療に伴うすべてのストレスを軽減するという目的のもと行為をしている。今研究で表現すべき麻酔行為は多次元性、動的特性、不確実性の点から特徴付けられる。なお、今回採用しているデータは東邦大学医療センター大森病院における2004年から2005年にかけて行ったフィールドワークを基にしている。

2.1 複数のアクターと機器:多次元性

手術室内では患者、麻酔科医、外科医、看護師等複数の職種の人間(ここではアクターと呼ぶ)、多数の機器が存在している。例えば、東邦大学医療センター大森病院で行われた整形外科の手術例では1つの手術に対して、整形外科医が3名、麻酔科医が3名、臨床工学技師が2名、看護師2名、医学生3名で、職種は5つ、人数は13名で行われていた。また、調査当日には8手術同時に行われていたために、手術室内には80名以上の人間が存在していたことになる。また、麻酔科医のみに焦点をあててみると、麻酔科全体を取り仕切る当日の責任者、副責任者が1人ずつ存在しおり、さらに1つの手術に対して、指導医、専門医、研修医、医学生の4名が存在している。このように、手術行為には複数の職種、複数のアクターが存在している。また、アクターだけではなく、アクターが利用している機器をとってみると、麻酔科医が利用するデジタルで数値として情報を提供する血圧計や体温計、アナログな音などで情報を提供する脈拍計などが存在する。[落合 2005, 奥出 2005]

2.2 動的特性

実際の麻酔行為には動的な処理、時間性の把握がとても重要である。麻酔科医である落合は麻酔管理において動的処理の重要性を述べており、手術中に行われているイベントに依存して、流動的であることを述べている。[落合 2005] 例えば、1つの麻酔行為をとってみても、行為を行った後の予測、行為、行為の結果、行為の妥当性の判断が連続して行われている。さらに、1つの行為がさらに次の行為を引き起こす場合も存在することや、複数の行為が同時に行われている場合も存在する。

また、複数のアクターによって把握すべき動的特性、時間性の幅は異なっている。今回ターゲットにした膝関節の置換術における整形外科の手術では総手術時間が概ね3時間弱だが、麻酔科医が投与する薬は投与から数分で行為結果が出るものが多く、短い分レベルの時間幅を持つ行為が継続して3時間行われている。さらに、薬に応じて発現時間や半減期に差があるために、全体の手術時間の把握(時間単位の時間性)と共に、数分の時間性の把握が麻酔科医には必要になる。一方、麻酔科医から見た外科医の時間性の把握は、1つの手術内に大きなイベントが4ブロック存在しており、数十分単位、イベント単位の時間幅を持っている。このように、麻酔科医の分レベル、秒レベルの時間性の把握は外科医や、看護師などの他の職種よりも短く、手術室内で行われている行為には複数の動的特性が存在しているのである。

2.3 不確実性

手術室内で麻酔科医が行っている行為には元来不確実性が存在している。元来と表現したのは、麻酔科医が対象とする患者自身が生来的に不確実性を有しているものだからである。医学において一般的な生理学的原理は断定できるのだが、患者個々のイベントの原因は特定できないものである。[Gaba 1994] 例えば、麻酔科医が投与する薬によってどのような作用が身体の中で行われているのかを見ることはできないものであるし、患者各個人によっても遺伝的な要因や、後天的な要因によってさまざまに反応が異なる。

さらに、患者という不確実なシステム、複数のアクターからの不確実性だけではなく、医療機器と患者の間にも不確実性は生まれる。一見すると、患者から取得されるデータは数値となっているために不確実性は有していないように見える。しかし、麻酔科医が患者の状態を予測するモニター機器からの情報は常にノイズ等を含んだ形となっている。例えば、患者の体温を計るために直腸から体温を計る場合には、外れる場合があり的確な体温を表示しない場合があるし、また、脈拍のリズムを教えてくれる音も外科医が電気メスを利用することにより大きく乱れた音として伝わる場合がある。これらのモニター機器から提供される不確実性を含んだ情報を解釈して麻酔科医は情報を取得している。

このように、患者、複数のアクターと機器などによってもたらされる不確実性の中で麻酔科医は行為をしているために、麻酔科医の行為は不確実性を元来含んでいる行為といえることができる。

2.4 行為表現条件の揭示

以上3つにわたる麻酔行為の表現のための条件を述べた。コンピュータ内で表現される麻酔行為には下記3つの条件が必要になる。

- 複数のアクターと機器における多次元的特性
- 時間性の把握を含む動的特性

- 麻酔行為の不確実性

3. 行為表現手法における先行研究

3.1 エキスパートシステムにおける表現

現在までも、医療における思考支援ソフトウェアシステムとして MYCIN を代表とするエキスパートシステムが存在してきた。エキスパートシステムは特定の与えられた領域における専門家をシミュレーションするコンピュータ支援システムとして、医療界において 1970 年代から利用されてきたシステムである。このシステムには多くの種類が存在するが、多くのシステムは専門家における意思決定の流れを if-then ルールを用いて記述していき、コンピュータ内に表現された知識空間を利用してユーザーに必要な情報を提供するというシステムである。[Castillo 1997]

しかしながら、エキスパートシステムにおける決定的表現のみでは麻酔行為を表現する手法としては有用なものにはなりえない。大きな問題としては行為表現条件における時間性の把握と不確実性の処理を表現することが難しい。決定的な表現のみでは、麻酔行為条件の不確実性部分を表現することができず、時間によって行為が変化する部分を表現することができない。麻酔科医の行為、身体的な知識は感や経験に大きく左右され、決定的な論理では表現できないのである。

3.2 ベイジアンネットワークによる表現

次に、不確実な処理に対して確率と状態ノードを用いて表現するベイジアンネットワークとその展開事例について説明する。

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。

しかしながら、通常のベイジアンネットワークでは麻酔行為表現の条件である動的特性を表現することは難しい。ベイジアンネットワークに対して動的特性を加味したものにはダイナミックベイジアンネットワーク(DBN)やテンポラリーベイジアンネットワークなどをあげることができる。[Russell 1995; Gustavo 2003] ダイナミックベイジアンネットワークとは、時間の幅を離散的に表現し、静的ベイジアンネットワークを時間軸にそって複数回作る手法である。また、Gustavo 達が提案しているテンポラリーベイジアンネットワークとは時間性の表現をノード内部の変数として表現している。テンポラリーベイジアンネットワークはノード内に時間を表現しているために、ネットワーク表現は DBN よりもシンプルになり、静的なベイジアンネットワークの推論表現などをそのまま利用可能にしている。このように、動的特性をベイジアンネットワーク内に導入した事例は DBN やテンポラリーベイジアンネットワークを利用した研究をあげることができる。

しかしながら、通常のダイナミックベイジアンネットワークやテンポラリーベイジアンネットワークによる手法では麻酔行為の分散性と時間性を表現することは難しい。ダイナミックベイジアンネットワークでは 1 つの時間軸の幅を用いて表現を行うために、麻酔行為の表現においては不可能ではないにしても、コンピュータ負荷の問題から限界がある。つまり、麻酔行為の動的特性には多次元性が同時にからんできているために DBN で採用されている単一の時間軸では、麻酔行為の表現が不可能なのである。麻酔行為には複数のアクターが存在し、それぞれは独自の時間の幅を持っているために 1 つの時間軸の幅では表現することはできるが、とても効率が悪いものとなる。例えば、麻酔科医の時間幅では、30 秒単位で時間が更新するのに対して、外科医の時間幅は数十分単位で更新される。どちらかの時間幅によせて DBN を構築することは可能だがとても効率が悪いものになる。また、テンポラリーベイジアンネットワークのように時間性の表現をノード内の変数として行うことは、麻酔行為の多次元性を同時に表現することは難しいものになる。このように、DBN やテンポラリーベイジアンネットワークでは多次元性を有した動的特性の表現において問題が発生してくる。

一方、多次元性を有したベイジアンネットワーク表現としては Koller たちによるオブジェクト指向ベイジアンネットワーク (OOBN) の研究をあげることができる。[Koller 1997] OOBN とはオブジェクト指向とベイジアンネットワークを融合させ、ベイジアンネットワークに再利用性と表現性を導入したものである。OOBN はさまざまな分野で利用されると同時に OOBN における表現性の拡張も同時になされてきている。例えば、OOBN は Lerner 達により動的特性を加味した OOBN として展開されてきている。彼等は OOBN を拡張したハイブリッドベイジアンネットワークを二酸化炭素から酸素を生み出す複雑なシステムの診断に利用している[Lerner 2002] OOBN によって、1 つのベイジアンネットワークノードを他のベイジアンネットワークノードとして利用できる再利用性が可能になってことで、1 つのベイジアンネットワークノードを複数のアクターで利用することが可能になってきた。

3.3 現状表現手法との問題把握

現状の表現手法と、麻酔行為の表現条件の問題をまとめると下記の 2 点になる。

- ダイナミックベイジアンネットワークでは麻酔における多次元性を有する時間性を表現することができない
- OOBN を用いた表現手法では、個人に即した行為の表現、目的に即した行為の表現をすることができない

今研究で提案するレイヤードダイナミックベイジアンネットワークは、動的特性においてはダイナミックベイジアンネットワークの表現手法、各層のベイジアンネットワークノードの表現においては OOBN における多次元性を利用しながら、上記の問題点解決していく必要がある。

4. ベイジアンネットワークレイヤーによる麻酔行為表現

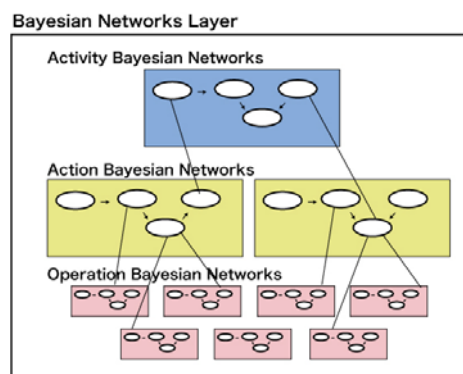
上記の多次元性を有した動的特性問題、各個人による表現性問題を解決するために、今研究ではベイジアンネットワークを複数融合させたレイヤードベイジアンネットワークを利用していく。

4.1 ベイジアンネットワークレイヤー

ベイジアンネットワークレイヤー (BNL) モデルとは、活動理論に従って抽象度を変えた 3 種類のベイジアンネットワークを層状

に配置したモデルである。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によって提唱された理論であり、人間の複雑な行為をアクティビティ(活動)、アクション(行為)、オペレーション(操作)の 3 つのレイヤーに分割して表現する理論ツールである。また、ベイジアンネットワークとは、1988 年にパール達によって提唱されたネットワークモデルであり、人間の曖昧で、不確実な行為を因果関係と条件付確率によって表現することで、不完全で、曖昧な表現を持ったまま表現することができる確率ネットワークモデルである。BNL モデルでは活動理論とベイジアンネットワークを用いて、システムを利用するグループとユーザーの目的を表すアクティビティベイジアンネットワークと、ユーザーの行為を表すアクションベイジアンネットワークと、行為がどのような観察から行われているかを表すオペレーションベイジアンネットワークを構築する。BNL モデルは、それぞれの 3 種類のベイジアンネットワークモデルを層状に配置し、統合したモデルであり、下記の図で表される。

ベイジアンネットワークレイヤーモデル構成図



アクティビティベイジアンネットワークでは、手術室内で行為を行う人(アクター)の状態と目的をネットワークとして表現している。手術室内で行為を行っている人には、複数の外科医、複数の麻酔科医、複数の看護師達が存在しているが、今研究では患者に対する麻酔科医の手術行為を主に表現するために、麻酔科医の目的と状態、外科医状態、患者状態をノードとして表現していく。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麻酔科医の行為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観察結果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、各個人の状態を表現する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内では、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それぞれの行為を表す患者状態ノード、麻酔科医行為ノード、麻酔科医経験ノードなどと共に、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、機器の捜査結果を表現するオペレーションノードによって構成される。アクションノードは上層のアクティビティベイジアンネットワークのアクションノードと同期しており、アクションベイジアンネットワークと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。アクションノードはアクションベイジアンネットワーク内では最後の枝ノード、子ノードとして構築されており、アクションベイジアンネットワークの結果を表現するノードである。また、オペレーションノードとは、オペレーションベイジアンネットワークとのインタフェースノードであり、

機器の状態の結果を表現するノードである。オペレーションノードは対応するアクションノードの親ノードとして構築される。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観察結果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、アクションノードの結果をアクティビティベイジアンネットワークに提供している。

3層目のオペレーションベイジアンネットワークでは、手術室にある各機器の状態を表現している。麻酔科医の行為にして情報を提供する各医療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には患者の状態を表現するために血圧計の数値を表現する血圧ノードや、脈拍計の数値を表現する脈拍ノードなどがある。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提供している。

このように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プレイヤーモデルである。

4.2 実装手法

上記の BNL モデルの実装には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 と推論を表現する C#プログラムの統合によって行う。

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。

4.3 BNL モデルの課題

ベイジアンネットワークプ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。このような推論システム

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

本研究では麻酔行為表現の条件を述べ、ベイジアンネットワークプレイヤーモデルを用いて麻酔行為の表現を行い、関連研究との比較から妥当性を述べた。

今後の展開としては、今回構築した麻酔行為表現のベイジアンネットワークを実際に動く形で検証を行い、ベイジアンネットワークの表現性とコンピュータ負荷のバランス点を導き出すことである。このバランス点を設定することで、表現力が豊かで、柔軟性が豊かなベイジアンネットワークモデルを構築していくことができる。

参考文献

- [落合 2005] 落合亮一: シミュレータとナビゲータ, in *心臓血管麻酔の進歩* edited by 武田純三他, 真興交易(株)医書出版部, 2005.
- [奥出 2005] 奥出直人, and 白鳥成彦. 麻酔ナビゲーション. in *心臓血管麻酔の進歩*, edited by 武田純三, 森田茂穂, 野村実, 山田達也 and 小出康弘: 真興交易(株)医書出版部, 2005
- [Gaba 1994] Gaba, David M., Kevin J. Fish, and Steven K. Howard. *Crisis management in anesthesiology*: Churchill Livingstone, 1994.
- [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.
- [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.