

乳幼児のよじ登り行動分析のための確率的因果構造モデリング

Modeling of Probabilistic Causal Structure for Analyzing Infant Climbing Behavior

野守耕爾^{*1*2*3}
Koji Nomori

本村陽一^{*2*3}
Yoichi Motomura

西田佳史^{*2*3}
Yoshifumi Nishida

山中龍宏^{*2*3*4}
Tatsuhiko Yamanaka

小松原明哲^{*5}
Akinori Komatsubara

^{*1} 早稲田大学大学院
Waseda University

^{*2} 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{*3} 科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST

^{*4} 緑園こどもクリニック
Ryokuen Children's Clinic

^{*5} 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

In this study, to prevent infant fall injuries by controlling environmental factors, based on observed behavior data, the causal structures between object attributes, infant characteristics, and climbing behaviors were modeled as the Bayesian Network Model. We found that infant climbing behaviors correlated with the height and surface area of the top face of the objects and the height of the infants. The probabilistic behavior model will be useful in predicting which object an infant tends to climb up, and also in controlling infant climbing behavior by operating object design. Further, we can control not only infant behaviors but infant injuries by integrating the developed behavior model and the explanatory model of injuries which was constructed from infant injury data.

1. 諸論

日本では、0歳を除く子どもの死因の第1位は不慮の事故であり、特に件数の多い乳幼児の事故対策は急務となっている[厚生労働省 07]。事故の種類は転倒・転落が最も多く、乳幼児は家庭内製品での事故が多い[坪井 08]。このような子どもの事故を防止するためには、データに基づく科学的な対策が必要であり[山中 07]、その方法として「子ども」、「保護者」、「環境」といった変数をコントロールすることが考えられる[田中 00]。教育などによって「子ども」をコントロールすることは、子どもが小さいうちはほぼ不可能である。また「保護者」をコントロール、つまり保護者への啓発・教育は、例えば安全チェックリストやパンフレット作成など[田中 01]、これまで多くの取組みがなされてきたが、事故の傾向は大きく改善しておらずそれだけでは不十分であり、また全ての責任を保護者の注意に委ねることは不可能である[山中 07]。そこで、「環境」のコントロールによる事故予防が求められている[WHO 06]。一般に、受動的アプローチと呼ばれるこのアプローチには、例えば、コーナガードやドアアクションのような安全グッズやチャイルドプルーフによる事故予防策[田中 00]があるが、どのように環境を改善すればどれほどの事故を予防できるのか、計算論的に明らかにする研究はなされていない。

また事故とはその多くが行動に伴って生ずる現象であり、行動とは人間と環境とのインタラクションによって発生する[Gibson 1966]。そこで環境に対する乳幼児の行動を定量的にモデル化できれば、事故に至るような行動を環境から事前に予測でき、さらに環境という変数を操作することでその危険な行動を制御し、事故の予防策を科学的に立案できる。なお本研究での「環境」とは日常生活空間に存在する製品・物のことである。

近年、子どもの行動をモデル化することにより、事故に至る行

動を予測し、事故を予防する取り組みがなされてきている。例えば、環境モデルと、乳幼児の発達行動のモデルを確率的に統合することによる、乳幼児の日常生活の行動モデリングがある[Kitamura 05]。このモデルにより、対象物の情報と、乳幼児の発達段階によって、どのような行動が発生しうるか確率推論できる。しかしこの環境モデルとは、主に物と乳幼児の距離と誘発される行動を関係づけたものであり、物の特徴と行動との関係性についてはほとんど明らかとされていない。

本研究では、転落事故に至るような乳幼児の日常的なよじ登り行動を、環境からコントロールすることを目指し、よじ登りの対象となる物の特徴と乳幼児の特性、そして誘発されるよじ登り行動との因果構造を、行動観察データに基づいて確率的にモデリングすることを目的とする。このモデルによってよじ登り行動が起こりやすい環境を予測でき、また物の設計値の操作により乳幼児のよじ登り行動を制御することで転落事故予防への応用が期待される。さらに、構築した行動制御モデルに事故データに基づく事故説明モデル[坪井 08]を統合することで、行動制御モデルから事故制御モデルを展開することを考え、環境から事故を計算論的にコントロールできることの可能性を検討する。

2. よじ登り行動に影響を与える要因の分析

モデル構築におけるパラメータの決定のため、本研究グループで収集している[坪井 08]、子どもの事故データ 3,585 件の内 4歳未満の子どもで、よじ登りなど自発的な行動から転落に至ったと思われる事故 107 件について、そのデータの自由記述回答部分から、そのような行動を起こした子どもの特徴と、行動対象となった物の特徴を分析した。これにより、よじ登り行動に影響を与えると思われる“物”と“乳幼児”の要因をまとめたものを図 1 に示す。なお“物”に関する要因は、物の設計においてコントロール可能なパラメータとして、基本的な物理属性にまとめた。続いてこの要因に基づき、よじ登り行動の発生における、物と乳幼児のインタラクションを明らかにするための実験を行う。

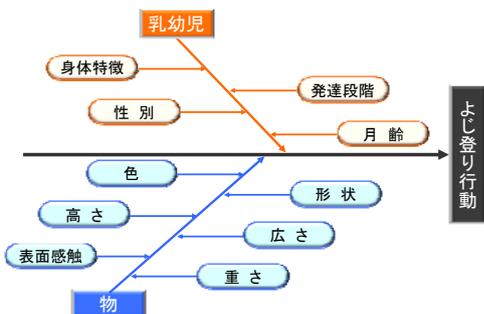


図1 よじ登り行動に影響を与える要因

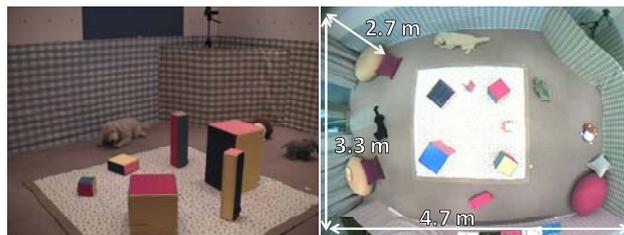


図3 実験部屋の様子

3. 実験

3.1. 実験の目的と概要

よじ登り行動における、「物」の特性と「乳幼児」の特性の関係性を明らかとするため、特徴の異なる物に対する乳幼児のよじ登り行動を計測する実験を行った。

3.2. 対象物の作成

実験で使用する物は、「形状」を全て正四角柱に統一した。これは日常生活空間を考えたとき、正四角柱(直方体)で近似しやすい物が多いと考えたからである。図1のよじ登り行動に影響を与えると思われる物の要因のうち、「高さ」、「広さ」、「重さ」、「感触」について、表1に示す水準を設け、「高さ」、「広さ」、「重さ」の各水準を組み合わせた18個の正四角柱を用意した。なお「広さ」とは正四角柱の上面(正方形)の幅を意味する。「感触」に関しては、各水準を均等に、この18個の正四角柱にランダムに割り当てた。これは「感触」がよじ登り行動に与える影響は、他の要因に比べ大きくないと考えたからである。また「色」に関しては、この影響を今回は考慮しないとして、全ての物の面を赤・黄・青で構成した。作成した物の例を図2に示す。

表1 物の要因と水準

要因	高さ	広さ(幅)	重さ	感触
水準1	10cm	10cm	軽い	滑る
水準2	30cm	20cm	重い	滑らない
水準3	50cm	30cm	-	柔らかい



図2 作成した物の例

3.3. 実験空間

実験を実施する部屋の様子を図3に示す。実験部屋には天井中央に部屋全体を撮影できる魚眼カメラ1台と、部屋の角にCCDカメラ2台が三脚で設置されており、この計3台のカメラで実験の様子を記録する。また実験空間をより日常空間に近づけ、被験者となる乳幼児が楽しく行動できるようにするため、部屋の中には、実験で使用する正四角柱の物以外に、クッションやぬいぐるみも置き、BGMも流した。しかし今回用意した正四角柱の物よりも著しく興味を持ってしまうようなもの(おもちゃやゲームなど)は、本実験の支障となるとして置かないようにした。

3.4. 実験手順

実験は13名の乳幼児(月齢10~30ヶ月)を対象に以下の手順で行った。また実験中の様子を図4に示す。

- ① 被験者の保護者に実験の説明を口頭と書面で行い、同意を得る。また被験者の「性別」「月齢」「身長」「体重」「発達段階」について調査するアンケートにも記入してもらう。
- ② 実験部屋に作成した正四角柱18個のうち6個を置き、この部屋で20分間保護者とともに乳幼児に自由に行動してもらう。その6個の選び方はランダムとする。
- ③ 設置する6個の正四角柱を入れ替えて②を3セット行う。

実験中の保護者への注意として、乳幼児の物に対する自然な行動を計測するため、保護者から物で行動するように勧めることはしないで、あくまで乳幼児の自由な行動を見守ってもらうようにした。乳幼児の行動を見守っている中で、その行動が危険と判断した場合には、その行動を止めてもらうようにした。

なお本実験は独立行政法人産業技術総合研究所の倫理委員会にて承認を得て、同研究所内の実験ルームで実施した。



図4 実験中の様子

4. よじ登り行動の確率的因果構造モデルの構築

4.1. 実験から得られた行動データ

実験で観察された行動のうち計測対象となるのは、興味を示した物に対して、その対象物によじ登ったのか、よじ登らなかったのか、というよじ登り行動の有無である。ここで「興味を示した」とは、物に触れその物を見ていること、また「よじ登った」とは、物に登り両足が完全に床面から離れることと定義した。

興味を示した物に対し、その物の特徴と乳幼児の特徴とともによじ登り行動の有無を1(よじ登る)と0(よじ登らない)で記録したところ、得られたデータ数は176となった。収集したデータ例を表2に示す。なお倒れた物に登った場合は、「高さ」や「広さ」が変化してしまうため、よじ登りのデータとして除外した。

表2 実験によって得られた行動データ

物	乳幼児							よじ登り行動の有無	
	重さ	高さ [cm]	広さ(幅) [cm]	感触	性別	月齢 [ヶ月]	身長 [cm]		体重 [kg]
重い	50	20	滑る	男	24	90	11	容易に階段を登れる	1
軽い	30	20	滑らない	男	24	90	11	容易に階段を登れる	0
軽い	50	20	柔らかい	男	24	90	11	容易に階段を登れる	0
重い	30	30	滑る	男	24	90	11	容易に階段を登れる	1
重い	50	30	滑らない	男	24	90	11	容易に階段を登れる	1
軽い	50	30	滑る	女	13	80	9	上手に歩ける	0
重い	10	30	滑らない	女	13	80	9	上手に歩ける	1
重い	50	20	滑る	女	13	80	9	上手に歩ける	0
軽い	30	30	柔らかい	男	10	70	9.5	つかまり立ちができる	0
重い	50	10	柔らかい	男	10	70	9.5	つかまり立ちができる	0
軽い	50	10	滑らない	男	10	70	9.5	つかまり立ちができる	0

4.2. よじ登り行動のモデリング

表 2 の実験データから、ベイジアンネットワーク[Motomura 01]により、要因間の確率的因果関係をモデリングした。

ベイジアンネットワークとは、複数の確率変数の間の依存関係をグラフ構造によって表わし、その変数間の定量的な関係を条件付き確率によって表わした確率モデルである。確率変数をノード、変数間の依存関係を有向リンクによって表わす。これにより、ある変数の値が決まったときに、未観測の変数の確率分布を推論することができる。

モデリングの結果を図 5 に示す。リンクの太さは関係の強さを表している。図 5 のモデルから、よじ登り行動は、物の「高さ」と「広さ(幅)」、そして乳幼児の「身長」と強い関係があることが分かる。物の「重さ」もよじ登り行動に関係があるかと思われたが、関係は見られなかった。

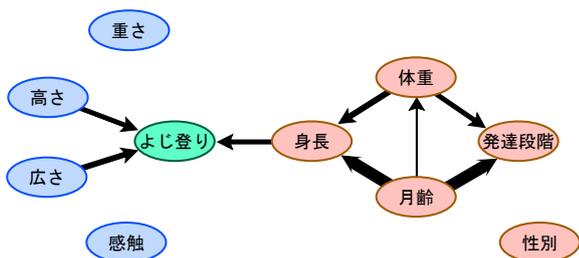


図 5 よじ登り行動の確率的因果構造モデル

4.3. モデルによる確率推論と考察

ベイジアンネットワークの特徴を利用し、ある状況下での「よじ登り」の発生確率を推論した。図 5 のモデルより「よじ登り」に直接リンクが張られた変数は、物の「高さ」と「広さ(幅)」、そして乳幼児の「身長」なので、この 3 つの変数を決定するだけで、「よじ登り」の確率を推論できる。乳幼児の「身長」をよじ登る確率の高い「80cm 以上」に固定した上で、物の「高さ」、「広さ(幅)」の値を変え、「よじ登り」の確率を推論した。この結果を図 6 に示す。図 6 より、例えば「広さ(幅)」を「30cm」から「20cm」に変更するだけで「よじ登り」の確率を大きく減少させられることが分かる。

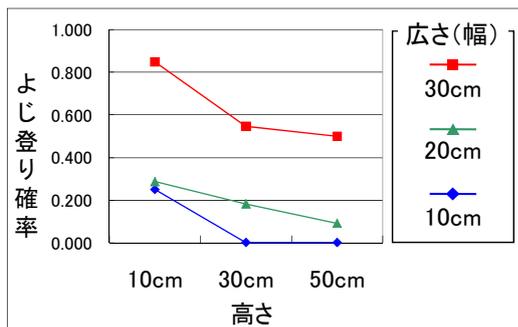


図 6 物の「高さ」、「広さ(幅)」と「よじ登り」の確率推論結果

4.4. モデルの評価

生成した行動予測モデルが、未観測の行動をどれくらい予測できるのか、leave-one-out cross-validation 法[Stone 1974]によって検証した。この方法は、標本群から 1 つの事例だけを抜き出してこれを評価用データとし、残りをモデル構築のための学習用データとする。これを全事例が 1 回ずつ評価用データとなるよう検定を繰り返す方法である。本研究では 13 名の被験者の行動データのうち、1 名の被験者のデータ群を評価用データとし、残りのデータでモデルを構築する。構築されたモデルによ

て、評価用データを条件とした時の「よじ登り」の確率分布を推論し、実際に発生した行動の予測確率をスコアとして採用する。評価用となった被験者のデータ群におけるスコアの平均値をその被験者の評価値とする。そして全被験者が 1 回ずつ評価用データとなるようにこの検定を繰り返し、評価値を計算する。各被験者の評価値の平均を計算したところ 0.789 (SD=0.108)であった。これは未観測の事象に対して、約 8 割の確率で予測可能ということとなり、モデルの予測精度は高いと言える。

以上のことから構築したよじ登り行動のモデルによって、物の属性からよじ登り行動を高い精度で定量的に予測できること、また環境を操作することによって乳幼児のよじ登り行動の起こりやすさを制御することが可能であることが示された。

5. よじ登りパターンの分析

4 章の実験において、よじ登りが発生した事例のみを収集し(データ数:95)、よじ登るときに状況や登り方など、表 3 に示す 6 つの変数を設け、よじ登りのパターンを分析した。そしてよじ登りの対象となった「物」の属性と、「よじ登りパターン」との関係、ベイジアンネットワークによりモデリングし、確率推論を行った。構築したモデルを図 7 に示す。なおこのモデリングでは、乳幼児の特性に関する変数は除いている。それはよじ登り行動が発生した事例のみを対象としているので、よじ登り行動が可能な発達した乳幼児の特性に偏ってしまうためである。

「物」の属性が「よじ登りパターン」に与える影響を確率推論により分析した結果、例えば支えを使って登るときは、物は軽い確率が高く、縁をつかんで登るときは、物は高く、重い確率が高く、膝から登るときは、物は広い確率が高く、また登りきれず失敗しやすいことが分かった。このように物の「高さ」、「広さ」だけでなく「重さ」、さらに「支え」や、物の「縁」の存在もよじ登りに影響を与えており、今後この要因に関しても検討の必要がある。

表 3 よじ登りパターンの記述変数

変数	よじ登り直前	支え	手の使用	体勢	登り方	よじ登り後
説明	登る際の直前の動作	登る際に支えを使用したか	登る際に手はどのように使用したか	登る際の体勢の傾き	登る際に手を除くどの身体部から接触したか	登った後の動作
カテゴリ	歩いている・走っている	あり	使わない	寝かす	胴体部から	立つ(両足)
	立っている	なし	支えをつかむ(少なくとも片手が)	起こす	膝から	立つ(片足)
	立っていない(座っているなど)	-	物の縁をつかむ(少なくとも片手が)	-	足の裏から	またぐ・座る・乗っかる
	-	-	物の上面に掌を置く(両手が)	-	-	寝そべる
	-	-	-	-	-	失敗(登りきれない)

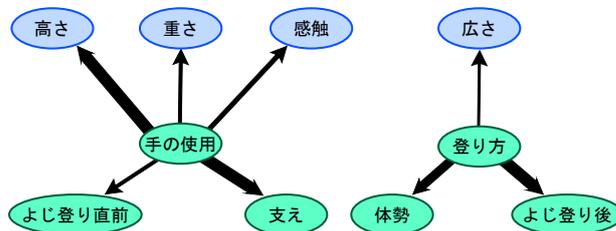


図 7 よじ登りパターンのモデル

6. 行動制御モデルから事故制御モデルへの展開

本研究で構築した図 5 のモデルは、「環境」と「行動」との関係をもモデル化したものであり、乳幼児のよじ登り行動を環境から予測し、さらに制御する「行動制御モデル」といえる。しかしこのモデルでは行動を予測・制御できても、その行動の結果生じる事故を予測し制御することができない。全てのよじ登り行動が転落事故に結び付くわけではないため、行動制御による子どもの事

故予防を考えた場合、全ての行動を制御するのではなく、事故に結び付く危険な行動のみ制御することが求められる。この問題を解決するためには、「環境」・「行動」・「事故」との関係構造をモデル化する必要がある。

「行動」と「事故」との関係性をモデル化したものとして、本研究グループで取り組まれている事故サーベイランスシステムによる事故説明モデルがある[坪井 08]。事故サーベイランスシステムとは事故予防を目的として、事故に関する情報を収集するシステムである。これにより性別・年齢など事故に遭った子どもの特徴、事故の発生した日時・場所、事故に関係した製品、事故に至る直前の行動、事故の種類、事故による怪我の種類、怪我をした部位など、事故に関する情報が収集可能である。現在、実際の病院において運用されている。そしてそこで得られた大量の事故データをベイジアンネットワークによりモデル化し、事故説明モデルとなる。このモデルの一部を図 8 に示す。

この事故説明モデルでは、事故の概要、すなわち事故に関するマクロな情報がモデル化されており、「環境」の特徴と「事故」との関係のようなミクロな情報はモデル化されていないため、実際の環境から事故を予測し、制御することができない。そこで本研究で「環境」と「よじ登り行動」との関係性をモデル化した行動制御モデルを、この事故説明モデルとモデルベースで統合、例えば各モデルの「行動」の変数を統合させることを考える。これにより、「環境」の特徴量から「行動」の起こりやすさ、そしてその「行動」から「事故」の起こりやすさを一貫して予測可能となり、行動制御モデルから初めて事故制御モデルとなりうる。転落事故の説明モデルに本研究のよじ登り行動の制御モデルを統合した転落事故制御モデルを図 9 に示す。このモデルにより、よじ登りの結果、転落事故となりやすい環境を定量的に予測でき、また事故の起こりにくい環境を設計することが可能となる。

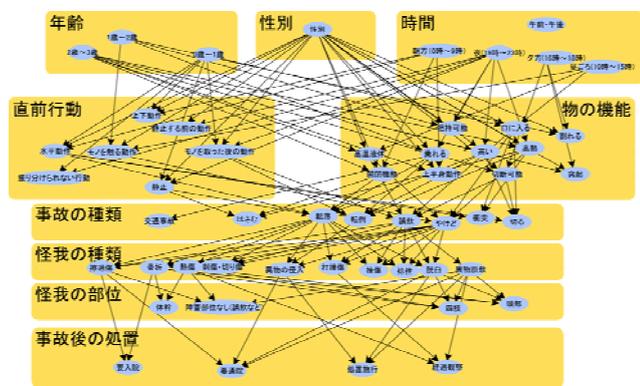


図 8 事故サーベイランスシステムによる事故説明モデル

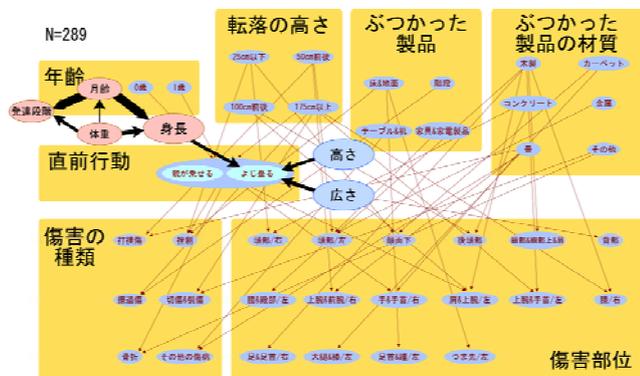


図 9 モデル統合による転落事故制御モデル

7. 結論

本研究では、日常生活で起こる転落事故に結び付くような乳幼児のよじ登り行動を、環境からコントロールすることを目指し、行動データの基づき、よじ登りの対象となる物の属性と、乳幼児の特性、そして誘発されるよじ登り行動との確率的因果関係を、ベイジアンネットワークによりモデリングした。さらに本研究で構築したよじ登りの行動モデルを、事故サーベイランスシステムによって構築される事故説明モデルと統合することにより事故制御モデルへの展開の可能性を示した。

モデリングの結果、乳幼児のよじ登り行動に大きく影響を与える要因は、物の高さや広さ、そして乳幼児の身長であり、乳幼児のよじ登り行動を物の属性から高い精度で定量的に予測できること、さらに物の属性の操作によって、乳幼児のよじ登りの起こりやすさを制御できることが示された。さらによじ登りパターンについてもモデリングし、よじ登りパターンに与える物の属性の影響を考察し、新たな検討要因が明らかとなった。

さらにこのよじ登り行動のモデルを事故説明モデルと統合することで、よじ登りの結果として転落事故になりやすい環境を予測でき、また物の属性の設計値を操作することで、事故に結び付くようなよじ登り行動を制御でき、安全な環境の設計支援に活用されることが期待される。

参考文献

[厚生労働省 07] 厚生労働省: 人口動態統計
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/old/k-jinkou.html>.
 [坪井 08] 坪井利樹, 西田佳史, 持丸正明, 河内まき子, 山中龍宏, 溝口博: 身体地図機能を有する事故サーベイランスシステムによる傷害統計, 第 26 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.3G1-02(1)-(4), 2008.
 [山中 07] 山中龍宏: Injury Prevention (障害予防) に取り組む 一 小児科医は何をすればよいのか 一, 小児内科, 39(7), pp.1006-1015, 2007.
 [田中 00] 田中哲郎: 新子どもの事故防止マニュアル, 診断と治療社, 2000.
 [田中 01] 田中哲郎, 石井博子, 加藤隆司: 健診の機会を利用した事故防止指導 ー新しい方式の考案とその評価ー, 小児科臨床, Vol.54, No.8, pp.1639-1646, 2001.
 [WHO 06] World Health Organization (WHO): Child and adolescent injury prevention: a WHO plan of action, 2006
http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/child_injuries/en/.
 [Gibson 1966] J. J. Gibson: The Senses Considered As Perceptual Systems, Houghton Mifflin, 1966.
 [Kitamura 05] K. Kitamura, Y. Nishida, N. Matsumoto, Y. Motomura, T. Yamanaka, H. Mizoguchi: Development of Infant Behavior Simulator: Modeling Grasping Achievement Behavior Based on Developmental Behavior Model and Environmental Interest Induction Model, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.17, No.6, pp.705-716, 2005.
 [坪井 08] 坪井利樹, 柴田康徳, 本村陽一, 西田佳史, 持丸正明, 河内まき子, 溝口博: 身体地図機能を有する事故サーベイランスシステム, 人工知能学会全国大会 2008 論文集, 3G3-1, 2008.
 [Motomura 01] Y. Motomura: BAYONET, Bayesian Network on Neural Network, Foundation of Real-World Intelligence, pp.28-37, CSLI California, 2001.
 [Stone 1974] M. Stone: Cross-validation and multinomial prediction, Biometrika, Vol.61, No.3, pp.509-515, 1974.