

エビデンスベースド・リスクアセスメント

—製品使用の予見から計算論的リスク評価まで—

Evidence-Based Risk Assessment

Foreseeing of Product Usage and Computational Evaluating of Risk

野守耕爾^{*1*2*3} 村井庸平^{*4} 宮崎祐介^{*4} 北村光司^{*3*5} 西田佳史^{*3*5} 本村陽一^{*3*5} 小松原明哲^{*1}
 Koji Nomori Yohei Murai Yusuke Miyazaki Koji Kitamura Yoshifumi Nishida Yoichi Motomura Akinori Komatsubara

^{*1} 早稲田大学大学院 Waseda University ^{*2} 日本学術振興会, 特別研究員 DC JSPS Research Fellow ^{*3} 産業技術総合研究所 AIST

^{*4} 金沢大学大学院 Kanazawa University ^{*5} 科学技術振興機構, CREST JST, CREST

This study proposes a new method of evidence-based risk assessment to design safety products by applying three technologies: text mining technology to child injury data, probabilistic modeling technology to child behavior, and biomechanical simulation technology to child injury. Text mining of narrative parts of injury data helps product designers learn types of potential behaviors related to a product and types of injuries due to the product use. The results of text mining allow product designers to create injurious incident scenarios. Probabilistic modeling of child behavior based on behavioral data allows product designers to compute the probability of the occurrence of the behavior related to the product. Biomechanical simulation of child injury allows product designers to compute the severity of the injury. The risk of the injurious incident scenario is estimated by the combination of the computed probability of the behavior and the computed severity of the injury.

1. 緒論

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、特に製品が伴う事故が大きな割合を占めている[厚労省2008]。また事故の種類は転倒・転落が最も多い。傷害予防では、一般に、「法整備」「教育」「環境・製品改善」の3つのアプローチが不可欠であるが、特に近年、事故の全責任を保護者の注意に委ねるのではなく、保護者が多少目を離しても死亡や重篤な傷害に至る事故を防ぐ、「環境・製品改善」による対策アプローチの重要性が世界的に主張されている[WHO 2008]。

製品改善による事故予防のためには、その製品に潜む危険を評価し、その危険を制御するように安全な製品を設計する必要がある。安全設計のための最も基本的な作業にリスクアセスメント[ISO14121 1999]がある。製品の安全設計におけるリスクアセスメントの大まかな手順は、1)製品の使用者と使用形態の予見、2)そこで発生する危険源の同定、3)そのリスク(危害の発生確率と危害のひどさの組み合わせ)の見積もり、4)そのリスクの低減策の必要性の評価、となっている。しかし、製品のリスクアセスメントを実施するメーカーは傷害データに乏しいため、実施されているのは、主観的な経験則に頼った定性的なリスクアセスメントとなっており、エビデンスベースドなリスクアセスメントを実行する方法論が確立されていないのが現状である。

本研究では、①大規模に収集された子どもの傷害データに基づいて製品への行動形態を抽出可能にするテキストマイニング技術、②製品に対する子どもの行動データに基づいて製品特徴から行動の発生を予測可能にする確率モデリング技術、③事故を再現して傷害の大きさを計算可能にする生体力学シミュレーション技術を応用することで、子どもに配慮した製品のリスクアセスメントをエビデンスベースドに可能にする手法を提案する。

連絡先:野守耕爾, 産業技術総合研究所, デジタルヒューマン工学研究センター, 〒135-0064 東京都江東区青海 2-3-26
 Tel: 03-3599-8318, E-mail: k.nomori@aist.go.jp

2. エビデンスベースド・リスクアセスメント手法

本研究で提案するエビデンスベースド・リスクアセスメント手法を図1に示す。以下にその手順の概要を示す。

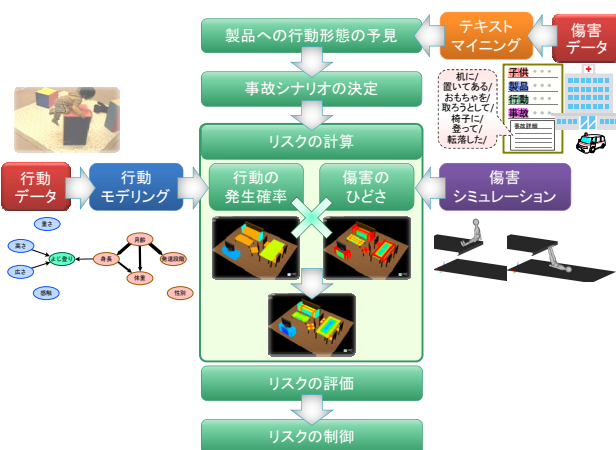


図1 エビデンスベースド・リスクアセスメント法

- (1)大規模に収集された傷害データの自由記述部分をテキストマイニングし、事故発生時に製品に対して行われた行動の種類を抽出する。
- (2)リスクアセスメントの対象となる製品への行動形態からその製品で発生する事故のシナリオを決定する。
- (3)その事故の原因行動の発生確率を、行動モデルに基づいて製品の特徴から計算する。行動モデルは、行動観察データに基づき、要因間の確率的因果関係をモデル化できるベイジアンネットワークによって、製品の特徴と行動発生との関係をモデリングする。なお本研究での製品への行動の発生確率とは、目の前の製品から行動が誘発される確率を指す。

本検索システムを製品設計者が用いることで、ある製品、あるいはある特徴を持つ製品に対して、指定した性別・年齢の子どもが行う行動の種類と、その結果として生じる事故の種類を過去の傷害データから検索でき、またその発生頻度も把握できる。またデータの基となった自由記述文も閲覧することで、実際に発生した事故の状況の詳細な情報も把握できる。これによりリスクアセスメントの対象製品において、エビデンスベースドにその行動形態が予測でき、それによる事故のシナリオが創出できる。

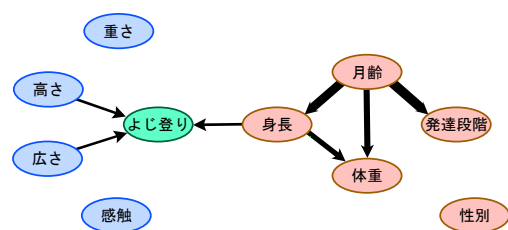


図5 よじ登り行動モデル

4. 子どもの行動モデリング

想定した事故シナリオのリスクをエビデンスベースドに計算するため、製品の特徴量から子どもの行動の発生確率を計算できる行動モデルを、行動観察データに基づいて構築する。本稿では「製品に乳幼児がよじ登って転落する」という事故シナリオを想定し、乳幼児のよじ登り行動のモデル構築[野守 2010]と、そのモデルに基づいて計算されたよじ登り行動の発生確率の日常生活環境における可視化(マッピング)について述べる。

4.1. 行動計測実験

特徴の異なる直方体の箱(ただしトップ面が正方形)に対する乳幼児のよじ登り行動を計測した。箱の「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個の箱を作成した。「広さ」とは、箱のトップ面の広さを意味する。「感触」に関しては、各水準を均等に、この18個の箱にランダムに割り当てた。また「色」の要因は考慮しないとして、全ての箱の面を赤・黄・青で構成した。

実験は、実験部屋に18個中6個の箱を置き、20分間保護者ととも乳幼児に自由に行動してもらった。これを設置する箱を入れ替えて3セット行った。実験の様子を図4に示す。

本実験は13名の乳幼児(月齢:10~30ヶ月)を対象に行われ、各箱に対する乳幼児のよじ登り行動の発生の有無に関するデータ(総データ数:176)を収集した。

表1 箱の特徴

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

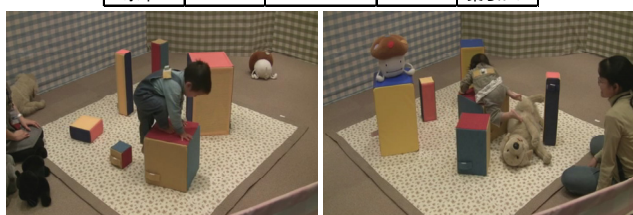


図4 実験中の様子

4.2. よじ登り行動モデルの構築

収集した乳幼児のよじ登り行動データに基づき、ベイジアンネットワーク[Motomura 01]によって、「物」・「乳幼児」・「よじ登り行動」の各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。構築したよじ登り行動モデルを図5に示す。図5のモデルより「よじ登り行動」に直接リンクが張られた変数は、物の「高さ」と「広さ」、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、「よじ登り行動」の発生確率を計算できる。

4.3. 行動発生マップ

このような行動モデルによって計算される行動の発生確率を、日常生活環境のCADモデルにマッピングすることで、子どもの行動がどこでどれくらい起こりやすいのかということを可視化できる。構築したよじ登り行動モデルに基づき、仮想的に用意したリビングのモデル(ソファ、ローテーブル、テレビ台、テーブル、椅子)において、そこに存在する製品の高さと面の広さ、乳幼児の身長からよじ登り行動の発生確率を計算し、それをマッピングした例を図6に示す。確率=1に近づくとき赤色に、確率=0に近づくとき青色に製品が着色される。なおテレビ本体、ソファと椅子の背もたれによじ登る可能性は無視している。図6より、身長が80cm以上90cm未満の乳幼児は、登れる場所がほとんどないが、90cm以上の乳幼児では、リビングにあるような家具には大体登れることが分かる。

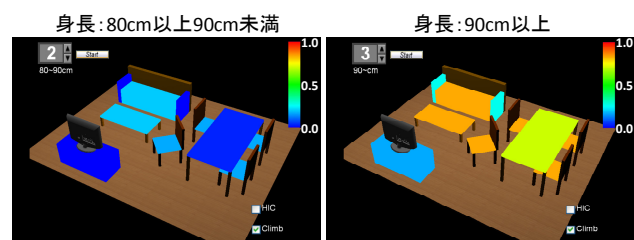


図6 よじ登り行動マップ

5. 傷害シミュレーション

想定した事故シナリオのリスクをエビデンスベースドに計算するため、その事故が発生した際に子どもが受ける傷害のひどさを生体力学シミュレーションによって計算する。本稿では前章と同様に、「製品に乳幼児がよじ登って転落する」という事故シナリオを想定し、乳幼児の転落シミュレーション[村井 2009]について述べる。

5.1. 転落時における頭部傷害値の計算

リスク算出のために計算される傷害のひどさは、 Worst Case であることが望まれる。転落事故において、頭部の衝突は重篤な傷害に結び付きやすいため、転落時の頭部の傷害のひどさを計算することにする。村井らは、1~3歳児の子どもマルチボディモデル[宮崎 2008]を用いて、転落直前に子どもが立っていた位置(転落面の縁までの距離)と転落の高さという、2つの一般化された転落条件から転落事故をシミュレーションし、それによって得られる頭部の加速度から衝突時の頭部傷害値(HIC: Head Injury Criterion)を計算している。例えば3歳児では、HICが900を超えると頭蓋骨骨折や脳震盪といった重篤な頭部傷害が発生するとされる。シミュレーションに用いたモデルは、いずれも四角形シェル要素の有限要素モデルにより構築し、材料特性は剛体としている。なお転落直前の子どもの姿勢条件は、最も危険な転倒姿勢である、直立で後方へ10度傾いた姿勢からの転倒としている。シミュレーションによる子どもモデルの転落挙動の例を図7に示す。

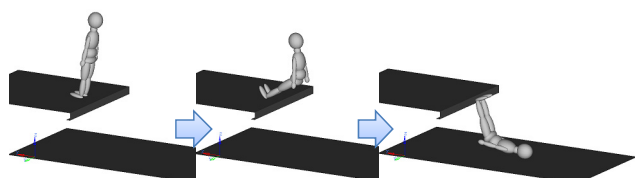


図7 転落シミュレーションの様子

5.2. 傷害危険度マップ

このような生体力学シミュレーションにより計算された傷害危険度を、日常生活環境の CAD モデルにマッピングすることで、潜在的な傷害の危険領域を可視化できる。この転落シミュレーションに基づき、4.4 節のリビングのモデルにおいて、そこに存在する製品が持つ水平面の縁までの距離と、その面の床までの高さ、乳幼児の年齢から、その位置で各方向に転落した場合の HIC を計算し、その最大値(ワーストケース)をマッピングした例を図 8 に示す。HIC=3000 に近づくると赤色に、HIC=0 に近づくると青色に着色される。なおテレビ本体、ソファと椅子の背もたれから転落する可能性は無視している。面の縁からの距離や面の高さによって、HIC の大きさに違いが生じているのは、転倒時に面の縁に下腿部や大腿部が接触し、回転運動を伴って床面へ転落するため、面の縁からの距離や面の高さによりその回転の仕方が変化し、頭部の床面への衝突の大きさも異なるためである。

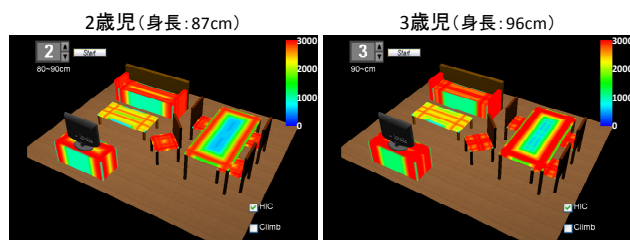


図8 転落傷害危険度マップ

6. リスクの計算

行動モデルによって計算された行動の発生確率と、傷害シミュレーションによって計算された傷害のひどさを組み合わせることによって、設定した事故シナリオのリスクをエビデンスベースドに計算できる。本稿では、「製品に乳幼児がよじ登って転落する」という事故シナリオのリスクを、4 章のよじ登り行動モデルと 5 章の転落シミュレーションに基づいて計算し、それを日常生活環境の CAD モデルにマッピングすることでリスクを可視化する。

4.4 節のリビングのモデルにおいて、よじ登り行動モデルによって計算されたよじ登り行動の発生確率と転落シミュレーションによって計算された HIC を乗算し、その値をよじ登り転落リスクとしてマッピングした例を図 9 に示す。HIC=3000 に近づくると赤色に、HIC=0 に近づくると青色に着色される。図 9 より、身長が 80cm 以上 90cm 未満の乳幼児は、そもそも製品に登る確率が低いいため、HIC が高くてもリスクは低くなっている。リビングにあるような家具には大体登ることができる、身長が 90cm 以上の乳幼児は、その登る確率に応じて HIC がリスクに変換されている。

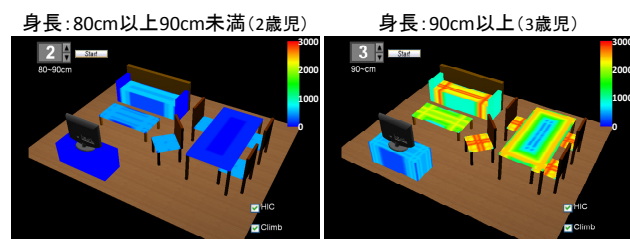


図9 よじ登り転落リスクマップ

7. 結論

本研究では、製品改善による事故予防のため、①大規模に収集された子どもの傷害データに基づいて製品への行動形態を抽出可能にするテキストマイニング技術、②製品に対する子どもの行動データに基づいて製品特徴から行動の発生を予測可能にする確率モデリング技術、③事故を再現して傷害の大きさを計算可能にする生体力学シミュレーション技術を応用することで、子どもに配慮した製品のリスクアセスメントをエビデンスベースドに可能にする手法を提案した。

本稿では、まず子どもの大規模傷害データをテキストマイニングすることで、子どもの製品に対する行動と発生した事故に関する情報の検索システムを開発した。これを製品設計者が用いることで、設計製品に対する行動形態をエビデンスベースドに予測可能にし、事故シナリオの決定を支援できる。続いて、「製品に乳幼児がよじ登って転落する」という事故シナリオを想定し、このリスクを計算するため、乳幼児の行動観察データに基づいたよじ登り行動モデルを構築し、製品の特徴(寸法)からよじ登り行動の発生確率を計算可能にした。また転落直前の乳幼児の位置から転落事故を生体力学的にシミュレーションすることで、転落時の傷害のひどさを計算可能にした。さらに計算されたよじ登り行動の発生確率と転落時の傷害のひどさを、日常生活環境の CAD モデル上にマッピングすることで、想定シナリオの定量的リスクをエビデンスベースドに可視化した。

以上のように、従来、主観的な経験則に頼らざるを得なかったリスクアセスメントを、近年利用可能になった技術を応用することで、エビデンスベースドに実行可能な方法論へと発展できることが示された。今後は、「製品に乳幼児がよじ登って転落する」という事故シナリオだけでなく、あらゆる事故シナリオのリスクを計算可能にする行動モデルと傷害シミュレーションのライブラリを多様に用意することが課題として挙げられる。

参考文献

- [厚生省 2008] 厚生労働省: 人口動態統計, 2008.
- [WHO 2008] World Health Organization: World report on child injury prevention, 2008.
- [ISO14121 1999] ISO14121: Safety of machinery – Principles of risk assessment, 1999.
- [本村 2006] 本村陽一, 西田佳史, 北村光司, 金子彩, 柴田康徳, 溝口博: 知識循環型事故サーベイランスシステム, 統計数理, Vol.54, No.2, pp.299-314, 2006.
- [野守 2010] 野守耕爾, 西田佳史, 本村陽一, 山中龍宏, 小松原明哲: 乳幼児の環境誘発行動を予測する計算モデルの開発, 人間工学, Vol.46, No.2, pp.166-171, 2010.
- [Motomura 01] Motomura, Y.: BAYONET, Bayesian Network on Neural Net-work, Foundation of Real-World Intelligence, pp.28-37, 2001.
- [村井 2009] 村井庸平, 宮崎祐介, 西田佳史, 北村光司: 生活環境内転倒事故における頭部傷害の危険領域可視化に関する研究, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009 スポーツ工学シンポジウム & シンポジウム: ヒューマンダイナミクス講演論文集, No.09-45, pp.306-310, 2009.
- [宮崎 2008] 宮崎祐介, 持丸正明, 西田佳史, 河内まき子, 宇治橋貞幸: 年齢別子ども転倒シミュレータによる遊具の転倒傷害危険度の可視化, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.6, pp.93-99, 2008.