

子どもの行動モデル群と傷害発生モデルに基づいた 時空間重ね合わせシミュレーションによる 製品に潜在するハイリスク状況の提示

Presenting Potential High-risk Situation by Spatiotemporally Superimposed Simulation
Based on Child Daily Behavior Model and Injury Model

小泉 喜典*1*2
Yoshinori Koizumi

西田 佳史*2*3
Yoshifumi Nishida

本村 陽一*2*3
Yoichi Motomura

山中 龍宏*4*2*3
Tatsuhiko Yamanaka

宮崎 祐介*5
Yusuke Miyazaki

溝口 博*1*2
Hiroshi Mizoguchi

*1東京理科大学

Tokyo University of Science

*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金沢大学

Kanazawa University

Injury prevention is one of the most important and urgent issues in children's health since the primary cause of death of children is unintentional injury. Passive approach, namely injury prevention approach by product modification is strongly needed. The risk assessment is one of the most fundamental methods to design safety products. However, the conventional risk assessment has not been able to deal with risk of childhood injury due to product use because product manufacturers have poor childhood injury data and child behavior data. Developing methodology of evidence-based assessment for childhood injury risk is required by product manufacturers. This paper proposes a system for presenting potential high-risk situation by spatiotemporally superimposed simulation based on child daily behavior model and injury model. To prove the effectiveness of the proposed system, this paper describes the application of the system to the risk analysis of a playground swing in a park. The system calculated the potential risk of head injury around the swing equipment.

1. 緒論

1歳から14歳の子どもの死亡原因の第1位は不慮の事故であり、その予防策の確立が急務となっている[山中 08]。子どもの事故予防の有効なアプローチの一つとして、環境改善による傷害予防法が求められている。World Health Organization(WHO)によるworld report on child injury prevention[WHO 08]の中でも、環境改善は、積極的な注意喚起を必要としないPassive approachとして、その必要性が強調されている。

環境改善による事故予防のためには、その環境に潜む危険を評価し、その危険を制御するように安全な環境を設計する必要がある。ものづくりの分野では、安全設計のための最も基本的な作業として、リスクアセスメントが提案されている[ISO/ICE 99]。リスクアセスメントは、図1に示すように、製品に潜む危険源を同定し、そのリスクを見積もり、そのリスクの低減策の必要性を評価するプロセスであり、機械を安全に設計する上で、現在最も広範囲で基本的な考え方として知られている。

今日、行われているリスクアセスメント技術の課題は、日常生活場面で使用やそれに伴うリスクを予測する道具立てが欠如している点にある。すなわち、日常生活での使われ方を考慮したデザインが困難である点にある。日常生活環境下での事故予防のための日常生活リスクアセスメントを実施する際、子どもが日常生活場面で製品に対してどのような行動をとり、その行動によってどのような事故が起き、どのような傷害に繋がるのかを考える必要がある。従来、日常生活のデータ、すな

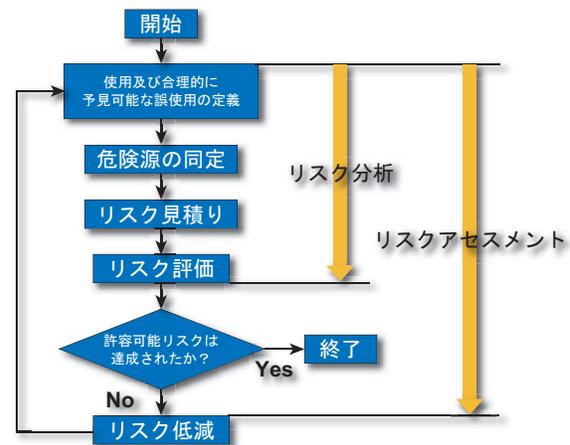


図1: 典型的なリスクアセスメントのプロセス

わち、子どもの行動、事故状況、傷害に関するデータは収集することが困難であり、十分に理解が進んでいなかった。そのため、日常生活リスクアセスメントは経験則に基づく方法となっており、データに基づくリスクの見積もりと評価が行われていなかった。

今日、ユビキタスセンサ技術やウェアラブルセンサ技術、インターネットを用いたテキスト情報収集技術などの多様なセンシング技術の発展により、日常生活、疫学といったマルチスケールレベルのデータ収集が可能になってきた。さらに、これらのセンシング技術によって得られた大規模なデータベースを

利用して、日常生活のような決定論的な記述方法では完全に表現することは難しい現象を取り扱う確率論的モデリング技術も利用可能になっている。また、計算機上で生体組織への応力集中や衝撃を計算可能にするバイオメカニクスシミュレーション技術も利用可能になっている。こうした技術を融合し、日常生活リスクアセスメントにおける問題をブレイクスルーすることで、データに基づくリスクアセスメントが可能になると考えられる。

本稿では、病院で収集された傷害データや、公園、学校などで収集した行動データなどの実データから作成された傷害発生モデルと子どもの行動モデルをバイオメカニクスシミュレーションと統合し、子どもの日常行動を製品設置空間で重ね合わせて再現することで、起こり得るハイリスクな事故状況を提示する方法を述べる。また、適用例として公園のブランコに焦点を当て、ブランコ周囲に潜む頭部傷害リスク分析について述べる。

2. 子どもの行動モデル群と傷害発生モデルに基づいた時空間重ね合わせシミュレーション

本稿では、子どもの行動モデル群と傷害発生モデルに基づいた時空間重ね合わせシミュレーションを提案する。図 2 にシステム構成図を示す。本システムにより、製品や環境の設計者に対し、子どもの日常生活空間に潜む傷害リスクの高い状況を視覚的、定量的に示すことで環境改善の支援が可能となる。以下、各モデルについて詳しく述べる。

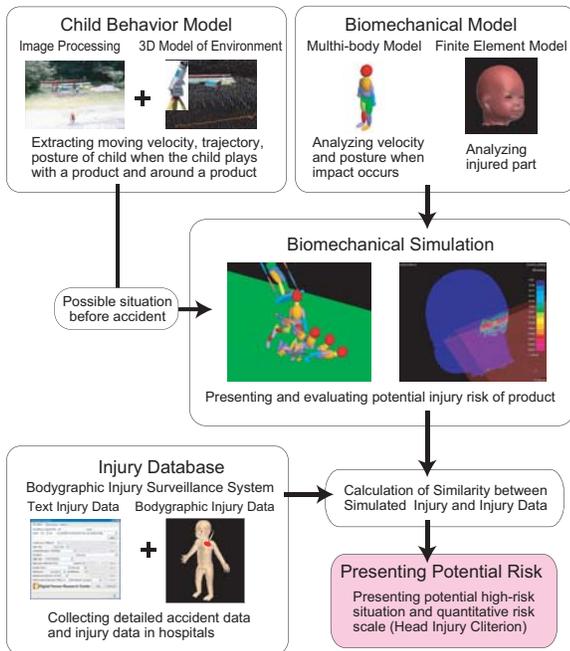


図 2: 提案システムの構成

2.1 生体モデル

交通事故、転倒、スポーツ等様々な場面において、衝撃が加えられた際の人体の挙動や傷害発生メカニズムを明らかにするため、バイオメカニクスの分野で多くの研究がなされている。例えば、屍体、動物、ボランティア、ダミー人形、コン

ピュータモデルを用いた手法、技術の開発が挙げられる。中でも、近年、倫理やコストの面で優れたコンピュータモデルを用いたシミュレーション技術が注目されている。宮崎らは、事故の原因を究明し、事故対策法の開発を支援するため、全身のマルチボディモデルと頭部の有限要素モデルを用いて、高速に転倒・転落および頭部傷害のシミュレーションを行い、事故の結果の情報から事故状況を推定する手法を提案している。本研究では、この手法を応用し、各子どもエージェントの行動シミュレーションを時空間的に重ね合わせて再現することで、どのような事故が発生し、どのような傷害に繋がりが得るのかをシミュレートする。以下にマルチボディ、有限要素の各コンピュータモデルについて詳しく述べる。

2.1.1 マルチボディモデル

マルチボディモデルは、剛体の体節とジョイントでモデル化されており、計算時間や姿勢変更の容易さに優位性を持つ。図 3(a) に示す、本研究で用いる子どものマルチボディモデルは宮崎らによって、実測された身体寸法に基づいて構築されたものである。このマルチボディモデルは全身が楕円体で近似された 17 の体節と 16 のジョイントによって構成されており、各関節には受動抵抗特性が設定され、接触剛性は Hybrid III ダミーの値に準ずる [宮崎 08]。

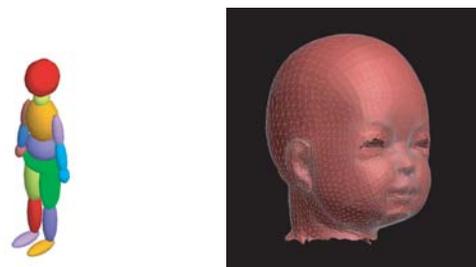
この子どものマルチボディモデルを用いることで、事故時における全身の挙動解析を大量に行え、それぞれの状況での頭部傷害の評価が可能となる。指標には Head Injury Criterion (HIC) を用いる。HIC は 1972 年に National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) によって定められ、自動車の衝突安全評価の際に頭部傷害の発生指標に用いられている。また、現在は欧州規格 EN 1177 や American Society for Testing and Materials International による F1292-04 の中でも、遊具周辺の地表面材料の安全性能の評価における頭部傷害の発生指標として用いられている。

HIC は衝突時に頭部重心に発生した加速度から求める。これが 1000 を超えると頭蓋骨骨折や脳震盪の発生確率が高まると言われている。

2.1.2 有限要素モデル

有限要素モデルを用いた解析では、マルチボディモデル解析に比べ計算時間を要するものの、より詳しい分析が可能となる。例えば、マルチボディモデル解析によって得られた衝突直前の姿勢や速度を与えることで、Von mises 応力を指標とした頭蓋骨骨折の発生可能性の評価やその位置の算出、また脳に加わる圧力から脳挫傷の発生可能性の評価などが可能となる。

本研究では、図 3(b) のように、身体地図機能を有する事故サーベイランスシステムに記録された傷害情報に対応させるこ



(a) 子どものマルチボディモデル

(b) 頭部有限要素モデル

図 3: 3次元生体モデル

とを目的とし、同システムで用いられている3次元人体モデルをもとに有限要素モデルを構築した。

このような人体モデルを用いた傷害シミュレーションを行う際、人体の力学的特性の忠実さが問題となる。本研究室では、千葉大学の法医学教室とAiセンター（死亡時画像診断）の共同で、ヒトの生体組織の動力学的な特性値を明らかにし、鑑定技術を高度化させる医工連携プロジェクトが進行中であり、鑑定工学として知見化された特性値を傷害予防研究に活用していく計画である。

2.2 傷害発生モデル

本研究室では、病院で傷害情報を含む事故の詳細な情報を継続的に収集する技術として、身体地図機能を有する事故サーベイランスシステムの構築を進めてきた [坪井 09]。身体空間座標上で傷害情報を記述することで、傷害情報を正規化・構造化して記録できる点に特徴がある。システムは病院において運用され、収集された傷害データは実際に不慮の事故により怪我をした子ども達のものである。記録される傷害データは、性別・年齢・発達段階・身長・体重・利き手など事故に遭った子どもの特徴と、事故の発生した日時・場所・事故に関係した製品・事故の種類・事故が起きる直前にしていた行動など最大26項目のテキストデータに加え、傷害の位置や形状といった情報を、計算機上で表示された3次元人体モデル上にマウス等でペイントすることで入力されるラスタデータから成る。

現在、このシステムを国立成育医療センターで運用し、実際に受診した子どもの事故情報の収集および分析を行っている。収集は2006年11月より始まり、これまでに蓄積されたデータに基づいて、身体空間統計や事故における製品と月齢の関係、受傷面積の極値統計といった傷害統計分析が可能になっている。図4は、例として4つの検索条件で検索した身体空間統計の結果を表示したものである。各条件を満たす事故事例の傷害の位置・形状を重ね合わせた頻度を表しており、赤い部分ほど頻度が高く、青い部分ほど頻度が低いことを示している。Aは熱傷、Bは1歳から2歳の男児の転落、Cは滑り台による事故、Dは滑り台を含む遊具の条件で検索した。

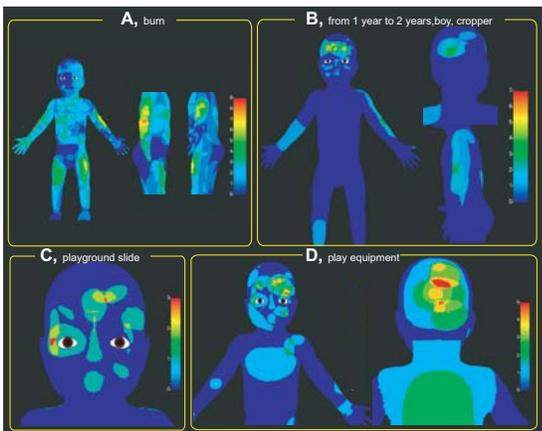


図4: 身体空間統計: 検索機能による条件付き傷害の検索

2.3 日常行動モデル

事故とはその多くが行動に伴って生ずる現象である。そこで、筆者らは、公園や学校、保育園などの日常生活空間にカメラシステムを導入し、子どもの日常行動観測を行っている。図5のように取得した動画データに画像処理を行い、子どもの、製品や親との距離、移動速度や軌跡などの行動の特徴を

抽出することで、子どもの日常行動モデルを構築することが可能になる。構築した行動モデルを用いることで、計算機上で様々な行動再現シミュレーションが可能となる。

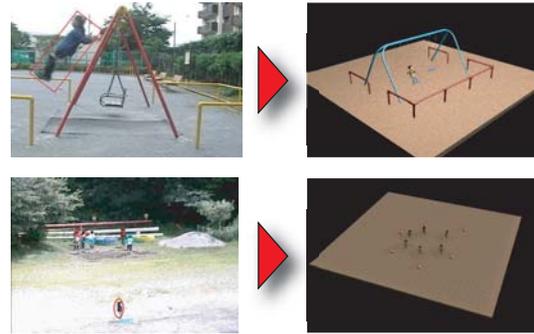


図5: 日常行動モデル (エージェントモデル) の構築

2.4 各モデルの統合

本研究では、図6に示すように、時空間重ね合わせによって、生体・傷害発生・日常行動の各モデルを統合した時空間重ね合わせシミュレーションを用いて製品に潜在するハイリスク状況の提示を行う。以下にそのハイリスク状況提示の手順を示す。

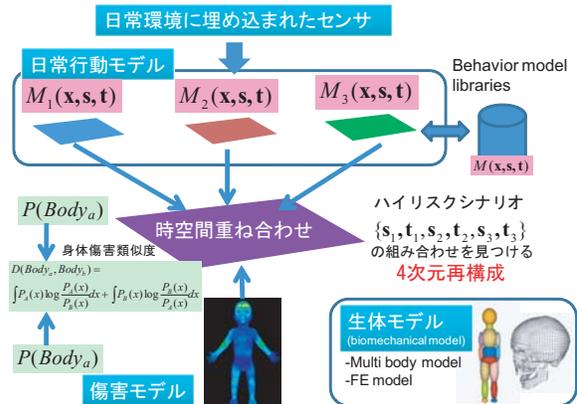


図6: ハイリスク状況の探索アルゴリズム

1. 子どもが対象の製品で遊んでいた、り、同時または別にその周囲で遊んでいるというような、センサから得られた位置情報・シナリオ・時間に基づく日常行動モデル ($M(x, s, t)$) を時空間情報と対応付けし、複数重ね合わせることで、衝突や転倒・転落事故が起きるような状況の候補を作成する。
2. 作成した状況候補からどのような事故が起き得るのか、マルチボディモデルを用いて、そのプロセスや衝突直前の子ども・製品の姿勢と速度を求める。また、頭部重心の加速度から頭部傷害の指標であるHICを求める。
3. マルチボディモデル解析から得られた衝突直前の姿勢や速度から、頭部有限要素モデルを用いて、頭部の中のどこに傷害が起き得るのかを求める。
4. 得られた傷害部位 ($P(\text{Body}_a)$) と傷害データベース内に記録されている過去に実際に起きた事故の傷害部位 ($P(\text{Body}_b)$) の類似度 ($D(\text{Body}_a, \text{Body}_b)$) を求め、最も類似した事故情報を検索する。

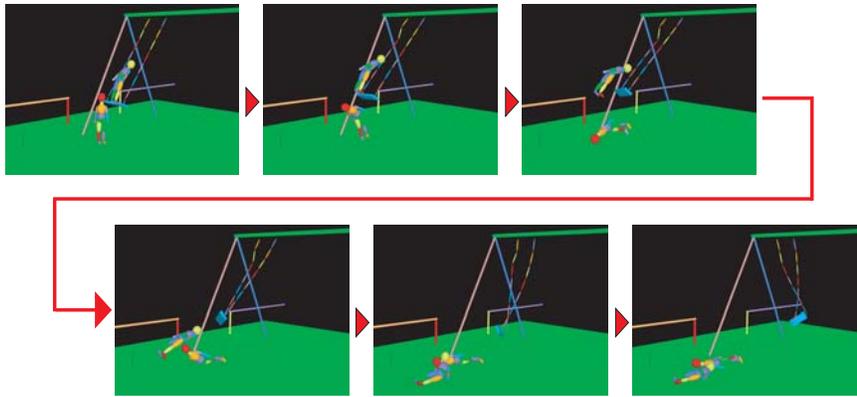


図 7: マルチ-ボディシミュレーションの結果例

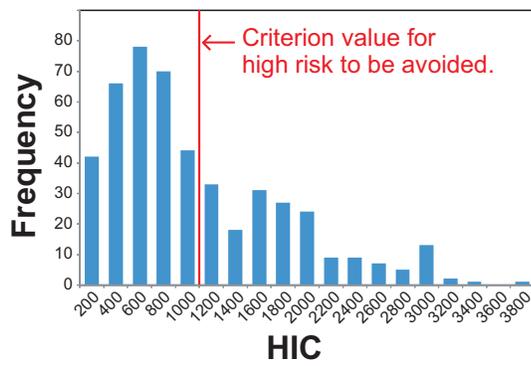


図 8: HIC のヒストグラム

5. 以上の手順を、日常行動モデルの組み合わせを変更し、大量に行うことで、製品に潜在的なハイリスク状況 (HIC が大きな状況) を探索し、製品や環境の設計者に提示する。

3. ハイリスク状況提示の事例

本節では、ブランコ周辺の事故を例に、ハイリスク状況提示の手順について述べる。

まず、公園にカメラを設置し、実際にブランコで遊ぶ子どもの行動観測を行う。ブランコにおける子どもの行動モデルは、位置情報や速度、角度といった物理パラメータからなる。同様にして、ボールを追い駆けるといった異なる種類の行動モデルを作成する (図 5 参照)。このような 2 種類の行動モデルを重ね合わせ、ブランコに乗って遊ぶ子どもとその周囲で遊ぶ子どもが衝突に至るシナリオを計算機上でシミュレーションする。

次に、衝突から少し遡った時点からの子どもやブランコの姿勢や速度、加速度すなわち事故のプロセスをマルチ-ボディモデルを用いたシミュレーションにより求める。図 7 にマルチ-ボディシミュレーションの一例を示す。図 8 のように、子どもの頭部の加速度からは、HIC を算出でき、頭蓋骨骨折や脳震盪のような頭部傷害の発生可能性評価が可能となる。

また、傷害分析をより詳しく行うため、衝突直前の姿勢や速度から、頭部有限要素モデルを用いたシミュレーションを行う。具体的には、接触判定から頭部の中でもどの位置に骨折が起き得るのかを調べる。

このような手順を繰り返し、大量に行うことで、ブランコの周囲で、どれくらい重篤な傷害が起き得るのか、また、重篤な

事故が起きるシナリオはどのようなものなのかを提示することが可能になる。更に、事故サーベイランスシステムを用いることで、シミュレーションした事故状況の中に実際に起きた事故に似た状況が含まれていないかを検索することも可能である。

4. 結論

著者らは、マルチ-ボディモデルや有限要素モデルからなるコンピュータモデルを用いた 3 次元生体モデル、病院において収集された事故情報から構築した傷害発生モデル、カメラ映像を画像処理することで抽出した日常行動モデルを統合し、日常生活空間に潜む傷害リスクの高い状況を探索・提示するシステムの開発を行っている。本稿では、開発中の時空間重ね合わせシミュレーションを構成する各モデルの機能や構築方法およびその統合方法について述べた。

また、ブランコ事故を例題とし、ブランコ事故による頭部傷害重症度分析を行うことでシミュレーション手順を示した。

参考文献

[山中 08] 山中龍宏, "傷害予防につながる情報収集へのアプローチ," 小児保健研究, Vol. 67, No. 2, pp. 177-190, 2008.

[WHO 08] World Health Organization (WHO), "World report on child injury prevention," (edited by M. Peden, K. Oyegbite, J. Ozanne-Smith, A. A. Hyder, C. Branche, A. F. Rahman, F. Rivara, and K. Bartolomeos), 2008.

[ISO/ICE 99] International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC), "Guide 51 Safety Aspects—Guidelines for Their Inclusion in Standards," 1999.

[宮崎 08] 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. 561-567, 2008.

[坪井 09] 坪井利樹, 北村光司, 西田佳史, 本村陽一, 高野太刀雄, 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," 人工知能学会誌, Vol. 24, No. 6, pp. 558-568, November 2009.