620 生活空間における子どもの転倒事故時の頭部外傷危険領域の可視化

Visualization of child head injury hazardous area in living spaces

正 宮崎 祐介 (金沢大) 北村 光司 (産総研/JST)

野守 耕爾 (早大) 西田 佳史 (産総研/JST)

Yusuke Miyazaki, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa

Koji Kitamura, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2-41-6, Aomi, Koto-ku, Tokyo

Koji Nomori, Waseda University, 3-4-1, Nishiookubo, Shinjuku, Tokyo

Yoshifumi Nishida, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,

This paper describes the development of the method to visualize hazardous area in living spaces regarding child head injury in falling. The method considered factors regarding both injury severity and frequency. The injury severity database was classified as the severity level of head injury in relation to falling height, the distance to the collision surface and the surface characteristics for head protection. The database was constructed based on both falling experiment using infant dummy and large amount of falling simulations using multi-body models for children. Moreover, a probabilistic model of climbing behavior, which assumes injury frequency, was constructed based on behavior measurement. Skull fracture possibility calculated from the database and the model was mapped on a 3D CAD model of a living environment. The method helps designers to easily prefind hazardous area in living spaces

Key Words: Injury prevention, Human dynamics, Multibody Dynamics, Behavior modeling, Visualization

A.1 結論

子どもの死因の第一位は不慮の事故であり,日常生活空間において発生する事故により,子どもの安全が脅かされている.そこで,日常生活空間に潜在する致命的な危険を顕在化・同定し提示する手法を開発することが,安全設計および消費者への情報提供の観点から重要である.本論文では特に重症度と頻度の高い子どもの転倒・転落事故に着目し,日常生活空間における子どもの転倒事故時の頭部外傷危険領域の可視化手法を開発することを目的とした.

A.2 頭部外傷重症度データベースの構築

シミュレーションおよび実験により頭部外傷重症度データベースを構築した.具体的には,生活環境内での転倒・転落事故を想定し,頭部外傷に影響すると思われる落下高さ,構造物の端部までの距離,床面特性の3因子を想定した.落下高さ,構造物の端部までの距離に関しては,子どものマルチボディモデルを用いた転倒シミュレーションにより,頭部外傷重症度との関係のデータベースを構築した.床面特性に関しては,乳幼児ダミーを用いた転落実験により各種床面の衝撃吸収性を計測した.

A.3 子どものよじ登り行動モデルの構築

子どもは発育・環境に応じて,行動が顕著に変化するため,生活環境内での行動可能領域が変化する.そこで,子どもの行動計測実験を行い,子どものよじ登り行動モデルを構築した.本モデルは,物の「高さ」と「広さ」,そして乳幼児の「身長」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.

A.4 生活空間の頭部外傷危険領域の可視化

頭蓋骨骨折発生確率とよじ登り行動確率を乗じることで,重症度と頻度を考慮した生活空間の頭部外傷危険領域を可視化し,その空間のリスク評価を定量的に行えるようになる.例えば図A1は3歳児で床が畳の場合の生活空間の頭蓋骨発生確率をよじ登り行動発生確率も考慮して3DCADモデル上にマッピングしたものである.このように,頭部外傷危険領域を可視化することで,生活空間の設計フェーズでの安全性評価,年齢に応じた生活空間の再設計の事前検討が可能となるとともに,生活者に対しては生活空間に潜在する重症外傷リスクを提示し,注意喚起することが可能となる.

A.4. 結論

日常生活空間に潜在する重症頭部外傷の危険領域を同定し,それを可視化するためには,生活環境内での子どもの存在確率と重症頭部外傷の発生確率を組み合わせる評価する方法が有効である.そこで,本論文では子どもの行動特性計測とシミュレーション・実験による頭部外傷重症度のデータベースを利用し,多様な日常生活空間に対応可能な頭部外傷の危険領域の可視化手法を開発した.

Fig.A1. Visualization of child head injury hazardous area

1. 背景と目的

子どもの死因の第一位は不慮の事故であり, 日常生活空間において発生する事故により, 子どもの安全が脅かされている. 重篤な傷害を防ぐためには, 広大かつ多様な日常生活空間に潜在する危険因子を把握し, その対策を講じなければならない. しかし, 生活空間を設計する設計者および保護者にとって, 生活空間に潜在する危険を, 経験や勘に頼って事前に把握することは不可能に近い. そこで, 日常生活空間に潜在する致命的な危険を顕在化・同定し提示する手法を開発することが, 安全設計および消費者への情報提供の観点から重要である. 本論文では特に重症度と頻度の高い子どもの転倒・転落事故に着目し, 日常生活空間における子どもの転倒事故時の頭部外傷危険領域の可視化手法を開発することを目的とした.

2. 生活空間における頭部外傷の危険領域可視化法

生活空間に潜在する重症頭部外傷の危険領域を可視化するためには, テーブル等生活環境内に存在する構造物から転倒・転落する際の重症度を評価する必要がある. また, 子ども, 特に乳幼児は発達段階・環境に応じて行動が変化し, 生活環境内での存在確率が変化する. したがって, 危険領域を同定し, それを可視化するためには, 生活環境内での子どもの存在確率と重症頭部外傷の発生確率を組み合わせる評価する方法が有効と考えられる. 本論文では子どもの行動特性計測とシミュレーション・実験による頭部外傷重症度評価を利用し, 日常生活空間における頭部外傷の危険領域の可視化を行う.

3. 頭部外傷重症度データベースの構築

生活空間における頭部外傷の重症度を決定するためには, その環境内で網羅的に転倒・転落事故実験もしくはシミュレーションを実施し, 得られる頭部外傷重症度を生活空間にマッピングする方法が有効であると考えられる. しかし, 生活空間は多種多様, 広大であるため, 前述の手法は非効率である. そこで, 頭部外傷におよぼす環境の因子を, 一般化し, シミュレーションおよび実験により頭部外傷重症度データベースをあらかじめ構築した. 具体的には, 生活環境内でのテーブルや椅子等からの転倒・転落事故を想定し, 頭部外傷に影響すると思われる落下高さ, 構造物の端部までの距離, 床面特性の3因子を選定した.

3.1 頭部外傷重症度の評価パラメータ

頭部外傷の重症度を評価するために, シミュレーションもしくはダミーを用いた実験によって得られる頭部重心並進

加速度応答から HIC 値(Head Injury Criterion)を計算した. HIC 値とは下式で計算され, 自動車の乗員拘束装置や遊具緩衝面の評価に用いられる.

$$HIC = \left[t_2 - t_1 \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right\}^{2.5} \right]_{\max} \quad (1)$$

ここで, $t_1[\text{sec}]$ は計算開始時刻, $t_2[\text{sec}]$ は計算終了時刻, $a(t)[\text{G}]$ は頭部重心の合成加速度応答である. さらに, Hertzの頭蓋骨骨折のリスクカーブ⁽¹⁾より, 実外傷の発生確率と関連付けた. Hertzのリスクカーブは次式により与えられる.

$$P_{\text{fracture}} = N \left(\frac{\ln(HIC) - 6.96352}{0.84664} \right) \quad (2)$$

ここで, N は対数正規累積分布関数である.

3.2 シミュレーションによる頭部外傷重症度データベースの構築

テーブル等の生活空間に存在する構造物形状のうち頭部外傷に関わる重要な因子は, 落下高さと構造物端部までの距離であると考えられる. そこで, 子どものマルチボディモデルを用いた転倒シミュレーションを用いてこれら因子と頭部外傷重症度との関係のデータベースを構築した⁽²⁾.

子どもマルチボディモデルは17の体節とその間を繋ぐ16の関節で構成され, 各体節を楕円体形状で近似された構造を有する. 日本人の子どもの寸法データより, 各年齢の平均寸法を算出し, これらより1, 2, 3歳児のモデルを構築した.

さらに転倒前に子どもが存在する面を基準面とし, 落下後に頭部が衝突する衝突面の2面からなる環境モデルを構築し, 落下高さと基準面端面までの距離を変数として転倒シミュレーションを実施した. 落下高さを10cmから120cmまで, 子どもの立位置と基準面の縁間の距離(以後, 立位置-基準面縁間距離)を0cmから120cmまで, それぞれ5cm間隔で変更してシミュレーションを行った. なお, 構造物形状の影響のみを抽出するために, 衝突面特性は剛体とした. また, 転倒姿勢は, 事前の検討において最も危険であった直立姿勢で後方へ転倒する姿勢とした.

各年齢において, 落下高さと立位置-基準面縁間距離を変化させたときの HIC 値の関係を図1に示した. これより, すべての年齢の共通の傾向として, 落下高さが高くなるにつれ HIC 値は高くなるが, ある一定の高さを超えると徐々に低くなる事がわかる. また, 立位置-基準面縁間距離が20~30cm付近で HIC 値はピークを示し, その後距離が遠くなるにつれ減少した. 特に80cm~100cm付近において HIC はほぼ0を示し, その後100cm程度から一定値を示した. 以

降3歳児の挙動を例にこれらの傾向を考察する。まず、落下高さが55cm, 立位置-基準面縁間距離20cmのとき、HIC値は最大値を示した。図2に示すように、この場合には子どもは基準面上で後方に転倒したのち、基準面の縁と下腿部が接触し、回転運動を伴いながら、衝突面へ転落する。このとき、下腿の接触により生ずる回転運動により頭部の並進速度が加速したため、HIC値が高かったと思われる。また、立位置-基準面縁間距離30cmの場合では、落下高さが高くなるにつれて一度ピークを取るが、その後HIC値が下がった。これは、下腿部や大腿部の面縁への接触による発生する回転運動により、体幹全体が1回転し頭部が最初に床面に衝突しなかったからであった。一方で、立位置-基準面縁間距離が85cmのとき最小危険度の0.02となった。この場合には、子どもは衝突面へ転落することなく、頭部は床面に衝突しなかった。また、足部-基準面縁間距離が95cmを超えたところで、HIC値は一定値を示した。これは、平面床での転倒と等価なためである。

3.3.ダミー実験による室内床面の衝撃吸収性評価

生活空間内における頭部外傷の重症度を決定する重要な因子として衝突床面の衝撃吸収性が挙げられる。そこで、乳幼児ダミーを用いた転落実験により、床面の頭部衝撃吸収性評価を行った。生活空間に存在する代表的な床面としてコンクリート、フローリング、カーペット（フローリング上）、畳を選定した。なお、フローリングの床下構造は木造住宅の床下構造を再現し、カーペットと畳は、フローリングの上に敷設した。実験に用いた乳幼児ダミーはCRABI 6month old(FTSS inc.)である。本ダミーの身長は乳幼児ダミーの姿勢を頭部から先に衝突するようにほぼ水平に保ち、床面から頭部下面までの高さを60cm (3.43m/s)として自由落下させた(図3)。なお、3.2節で説明した転倒シミュレーションでは、平面床への転倒の場合、頭部の床面への衝突速度は2.83~3.26m/sであり、本実験の頭部衝突速度はシミュレーションにおけ

Fig.1 Relationship between HIC, fall height and distance from standing position to the collision surface

Fig.2 Falling behavior (height:55cm distance:5cm)

る衝突速度とほぼ等しい。以上の条件のもと乳幼児ダミーの落下実験を行い、各々の床面における HIC 値を取得し、さらにコンクリートを剛体面と仮定し、コンクリートにおける HIC 値に対する各床面の HIC 値の比を算出した(図 4)。HIC 値はフローリングではコンクリートに対して 30%, 畳では、およそ半減した。

4. 子どものよじ登り行動モデルの構築

子どもは発育・環境に応じて、行動が顕著に変化する。したがって、発育に伴う生活環境内での行動可能領域の変化によって、頭部外傷危険領域も変化すると考えられる。これまでに、著者らは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した⁽³⁾。本章では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モデルの構築について述べる。

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、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

Fig.3 Free fall experiment

Fig.4 HIC ratio calculated as concrete surface case vs. each surface.

成した(表 1)。「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 分間保護者とともに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 5 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。

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 6 に示す。図 6 のモデルより「よじ登り行動」に直

Table 1 Factors and levels in the objects

Factor	Height[cm]	Area[cm ²]	Weight	Feeling
Level1	10	100	Heavy	Slip
Level2	30	400	Light	Stick
Level3	50	900	-	Soft

Fig.5 Climbing behavior experiment

Fig.6 Model of infant climbing behavior

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。

5.生活空間の頭部外傷危険領域の可視化

4.1 および 4.2 節において生活空間内における子どもの転倒時の頭部外傷の重症度のデータベースを構築した。本データベースは、頭部外傷の重症度に関わる因子を、年齢、落下高さ、立位置から構造端部までの距離、床面特性の 3 因子に限定しているものである。したがって、これらの因子を決定すれば頭部外傷の重症度を瞬時に算出することが出来る。また、4.3 節では子どものよじ登り行動の確率モデルを構築し、よじ登り行動確率を、子どもの身長、対象物の高さや広さを指定すれば計算することが可能となった。

したがって、日常生活空間の CAD モデル内でこれら因子を計算しそれをマッピングすれば、子どもの頭部外傷重症度、行動確率、これらの組み合わせで計算される頭部外傷危険領域を可視化することができる。そこで、図 7 に示す日常生活空間（ダイニングテーブルセット、ソファ、リビングテーブル、テレビボード）を例として 3D 生活環境モデルを構築し、本モデル内で頭部外傷重症度、行動確率、頭部外傷危険領域の可視化を行った。なお、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た。

5.1 頭部外傷重症度の可視化

4 章で構築した頭部外傷重症度データベースに基づき、対象生活空間の頭部外傷重症度を可視化した。まず、4.2 節で構築した HIC 値と年齢、落下高さ、立位置—基準面縁間距離との関係から、生活空間の構造・形状に起因する頭蓋骨骨折確率を算出した。図の生活空間の CAD モデル内の各々の位置に関して落下高さ、構造縁までの距離を算出し、HIC 値をデータベースより引用する。なお、4.2 節で構築したデータベースは剛体床面におけるシミュレーションの結果であるため、4.3 節のダミー実験におけるコンクリート面に対する実験結果と等価であると仮定した。そして、床面特性に応じて、コンクリート面に対する HIC 比を乗ずることにより、床面特性の違いによる影響を考慮した。

以上より年齢、落下高さ、立位置—家具縁間距離、床面に応じて算出される HIC 値を式 2 に代入することにより頭蓋骨骨折発生確率を算出した。図 8 に 1 例として、3 歳児におけるコンクリート面と畳面の場合の頭蓋骨骨折発生確率を示した。図中赤色が骨折発生確率 100% であり、青色が 0% である。ダイニングテーブル等において、テーブルの縁よりも若干内側の領域において頭蓋骨骨折発生確率が高くなっ

Fig 7 3D model of a living room

(a) Concrete surface

(b) Tatami surface

Fig.8 Possibility of a skull fracture in the case considered only the severity

た。これは、4.2 節で説明したように、テーブルの縁よりも内側からの転倒の場合、大腿・下腿とテーブル縁との接触によって全身の挙動に回転運動が生じ、その結果として頭部の衝突速度が速くなるからである。また、コンクリート面においては骨折確率が 1 に近い領域が広く存在するが、床面を畳に変更すると赤色領域が消滅することが容易に視認することができる。

5.2 よじのぼり行動確率の可視化

4 章で構築した行動モデルによって計算されるよじのぼり行動の発生確率を、製品の高さや面の広さ、乳幼児の身長

から計算し、それをマッピングした場合を図9に示した。図9より、2歳児を想定した身長が80cm以上90cm未満の乳幼児は、登れる場所がほとんどないが、3歳児以上の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。

5.3 行動・重症度確率を考慮した頭部外傷危険領域の可視化

5.1で示した頭蓋骨骨折重傷度確率と5.2節で示したよじ登り行動確率を乗じることで、重症度と頻度を考慮した生活空間の頭部外傷危険領域を可視化し、その空間のリスク評価を定量的に行えるようになる。図10は床面が畳の場合の1、3歳における頭部外傷危険領域を可視化したものである。この図より3歳児においてはよじ登り可能な家具が多いため、頭部外傷が発生する危険性がより高いが、1歳児ではまだよじ登ることができない家具が存在するため、頭部外傷発生リスクは低い。このように、日常生活空間の3DCADモデルに行動・重症頭部外傷発生確率を考慮した頭部外傷危険領域を可視化することにより、設計の観点からは生活空間の設計フェーズでの安全性評価、年齢に応じた生活空間の再設計の事前検討が可能となり、生活者に対しては生活空間に潜在的な重症外傷リスクを提示し、注意喚起することが可能となる。

6.まとめ

日常生活空間に潜在的な重症頭部外傷の危険領域を同定し、それを可視化するためには、生活環境内での子どもの存在確率と重症頭部外傷の発生確率を組み合わせる評価する方法が有効である。そこで、本論文では子どもの行動特性計測とシミュレーション・実験による頭部外傷重症度のデータベースを利用し、多様な日常生活空間に対応可能な頭部外傷の危険領域の可視化手法を開発した。今後は、外傷データベースの拡充と、実傷害データとの比較による本手法の検証が必要である。

参考文献

- (1) Hertz E., A note on the Head Injury Criterion(HIC) as a Predictor of the Risk of Skull Fracture, 37th Annual Proceeding of AAAM(1993)
- (2) 村井ら, 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, 機構論, No.09-45, 306-310 (2009)
- (3) 野守ら, 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, 166-171(2010)

(a) 2 years old

(b) 3 years old

Fig.9 Possibility of climbing behavior

(b) 1 years old

Fig.10 Possibility of a severe head injury in the case considered the severity and climbing behavior