B-15 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

Visualization of hazardous location in living environment regarding head injury in case of falling

村井庸平・金沢大院

宮崎祐介・金沢大

Yohei Murai, Kanazawa University

Yusuke Miyazaki, Kanazawa University

西田佳史・産総研

北村光司・産総研

Yoshifumi Nishida, AIST

Koji Kitamura, AIST

Key Words: falling accident, living environment, visualization, hazard map, child

論文要旨

The purpose of this study is to visualize a hazardous location in living environment regarding head injury by falling. In particular, the generalized method applying for various living environments was developed. In the method, general head injury database in case of falling in living environment was constructed. The database is based on large amount of simulation results using a multi-body model for 3years old child. And, the database classified the severity level of head injury in relation to falling height and the distance to the collision surface. In order to visualize the hazardous location in a targeted living environment, the severity level of head injury were mapped on the 3D CAD model of the environment based on the database by calculating the distance and height from standing position to collision objects such as furniture. The method made it possible to easily visualize a living environment in shorter time.

1. 緒言

自動回転ドアの事故や、箱ブランコやすべり台等の遊具による事故など、子どもの日常生活空間において、子どもの安全が脅かされている。このような事故から子どもを守るためには、これら製品・環境と人間とのシステム不調和により発生する事故を徹底的に調査することにより事故原因を解明するとともに、日常生活空間内に存在する未知の危険を顕在化し、それを製品設計にフィードバックする知識循環社会を構築する必要がある。西田らの事故サーベイランスシステムを基盤として現在取り組みが始まっている⁽¹⁾。

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未知の重篤な危険因子を把握し、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その対策を持続的に講じる保護者にとって、広大かつ多様な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。

そこで、著者らは転落事故発生遊具の未知の危険を顕在化するために、子どもの全身マルチボディモデルを用いて、事故環境内での網羅的な転落シミュレーションを行うことにより、対象遊具に潜在する重篤な頭部外傷危険領域の可視化を行った⁽²⁾。しかし、この方法は、対象とする各々の生活空間において大量のシミュレーションを行う必要があるため、多様に配置が変化する様々な生活環境に対応することや、設計変更の効果を確認するには再計算が必要なことにより、多大な時間とコストが必要であり、その高速化が求められていた。

そこで、本研究では、多様な生活環境における転落時の頭部傷害危険度をより簡便に可視化できる手法の開発を目的とした。具体的には、生活空間内における転落条件とその危険度を一般化した傷害データベースをあらかじめ構築し、それを対象生活空間内にマッピングすることにより、多種多様な生活環境に対して簡便かつ高速に危険領域の可視化を行

う手法を開発する。

2. 生活空間内における頭部傷害の危険領域可視化法

多種多様な生活空間における転倒事故における頭部傷害の危険領域を可視化するために、それぞれの環境内に対して、転落事故シミュレーションを大量に実行することは非効率的である。そこで本研究では、生活環境内における転倒条件を一般化し、あらかじめ転倒事故時における頭部傷害データベースを構築する。さらに、各々の環境下の CAD モデルにおいて転倒条件のみを算出し、データベースより引用した傷害危険度を CAD モデル上にマッピングすることにより、生活空間内における危険領域を可視化する。

2.1 子どもマルチボディモデル⁽²⁾

転倒事故時における頭部傷害の危険領域を可視化する上で用いる人体モデルとしてマルチボディモデルと有限要素モデルが挙げられる。本研究では条件変更が容易でかつ高速計算可能なマルチボディモデルを用いる。子どもマルチボディモデルは宮崎らによって構築された3歳児子どもマルチボディモデルを用いた⁽²⁾。

3歳児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ている。

また、各体節は、子どもの寸法データを基に楕円体の半径、中心位置、関節位置を導出されており、慣性特性は、日本人幼少年の身体部分係数と、各体節の部分長から得た慣性特性を適用している。

2.2 頭部傷害の評価パラメータ

本研究では、子ども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って得られる頭部加速度から HIC 値(Head Injury Criterion)を計算した。HIC 値とは下式で表される頭部加速度により与えられる頭部傷害値で、本研究で対象とした3歳児の場合、この値が900を超えると頭蓋骨折もしくは脳震盪が発生するとされる。

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

さらに、頭部傷害危険度を可視化するにあたり、その危険度の評価は、転倒箇所から4方向に転倒した場合を想定し、これら4方向の転倒で得られたHIC値の平均を算出し、その値を基準値と比較した危険率で評価する。基準値となるHIC値は3歳児の頭部外傷耐性値である900とし、算出された平均のHIC値を900で除することにより得られた値を危険率として1を超えると赤に近づき下回ると青に近づくように可視化する。また、危険度マップ上では、危険率の最大値を2とし、2以上の危険率の点においては赤色で評価した。危険率の最小値は0とした。

2.3 転倒直前の姿勢の決定

転倒直前の姿勢にはさまざまな姿勢が考えられ、姿勢の自由度を考慮するとその設計変数空間は非常に広大になる。しかしながら、生活環境内の頭部傷害危険度を評価する観点からは、各々の空間におけるワーストケースを評価すればよい。そこで、本研究では、最も危険な転倒姿勢を、平面床における転倒シミュレーションにより決定した。なお、転倒シミュレーションには、衝突解析ソフトウェアMADYMO ver 7.0 (TASS JAPAN)を用いている。

平面床における転倒シミュレーションでは、実際に取りうる可能性のある姿勢や行動を任意にモデルに与えシミュレーションを行った。また、それぞれの姿勢に対して、上腕部と大腿部に0~3m/sの初速度を付与し、転倒前の行動を表現した。歩行、走行、直立のそれぞれを模擬した姿勢の例を図1に示す。直立の姿勢は、後方への傾きを床面と垂直の状態から10°傾けた姿勢とした。これらの条件で、任意に姿勢と初速度を変更し、50例の転倒シミュレーションを行った。

これらのシミュレーションの結果からその例として、直立、歩行、走行姿勢において初速度0[m/s]における結果を表1に示した。これらの結果より直立姿勢から後方に転倒した際にHIC値が最も高いことが分かった。直立姿勢における転倒では、足部と腰部を中心とした回転運動により転倒する。そのため、頭部が他の体節よりも先に床面に衝突する。そのため頭部の衝突速度が減速することがないため、HIC値が高かったと考えられる。一方で、歩行および走行姿勢からの転倒も足部と腰部を中心とした回転運動により転倒するが、直立姿勢とは異なり、真後ろに転倒することはない、やや側方に転倒するため、頭部が床面に接触する前に腕部や手部、肩部が床面に接触する。そのため、直立姿勢における後方転倒時よりもHIC値が低くなったと考えられる。

以上から、今後の転倒シミュレーションは、全て直立で後方へ10°傾いた姿勢からの転倒とする。

2.4 転倒時の頭部傷害データベースの構築

次に、生活環境内における転倒条件を一般化し、あらかじめ転倒事故時における頭部傷害データベースを構築した。生活環境内における転倒事故は、平面の床面上で転倒するケース、テーブルや椅子上からより落下高さを有して転落するケース、また、テーブルの角への衝突など床面よりも落下高さが低い状態で対象物に衝突ケースが考えられる。これらのケースにおいて転落条件を一般化すると、衝突面までの距離と高さが重要であると考えられる。そこで、本研究では床面を基準面とし、その面に対して頭部が衝突する面が下方にあり落下するケースと、衝突面が上方にありその床面に対して頭部が衝突するケースの二通りに対して、衝突面高さや距離を変数として頭部傷害データベースを構築した。

Fig.1 Postures before falling

Table 1 Maximum HIC values in each posture

	Walking	Running	Standing
HIC	400	320	660

なお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の有限要素モデルにより構築し、材料特性は剛体とした。また、モデルは、HyperMesh ver9.0 (Altair engineering co)により構築した。

2.5 生活環境における転倒時の頭部傷害危険領域の可視化

2.4節で構築した転倒時の頭部傷害データベースから、衝突面の高さや距離に応じて頭部傷害危険度を参照し、それを生活環境のCADモデル上にマッピングすることにより生活環境における頭部傷害危険領域の可視化を行った。なお、本可視化プログラムはMatlab&Simulink R2009b (The MathWorks Inc.)により構築した。

危険領域を可視化するための生活環境の例として図2に示す室内生活空間モデルの構築を行った。本生活空間内にはテーブルが4脚とそれに付随する椅子やソファが3セット存在する。テーブルの天板高さはそれぞれ40cm, 55cm, 90cm, 120cm、椅子の座面高さは40cmとした。本生活空間内において5cm間隔に格子状に点を配置し、各々の点から4方向へ衝突物探索を行い、これらのテーブルや椅子などの衝突面に対する距離と高さを算出した。さらに、4方向への衝突物探索の結果より、2.2節で述べたようにその距離と高さに応じて頭部傷害危険度を算出し、その平均をマッピングした。なお、テーブルモデルの傍に椅子モデルがある場合には、テーブルの高さから椅子モデルの座面高さを引いた値を落下高さとしてHIC値の参照を行った。また今回はより簡単に可視化を行うため、椅子モデルの背もたれの影響は無視して、可視化を行った。また、床面上の危険領域可視化では、直立からの転倒が起こりえない高さの低いテーブルや椅子の下は危険度は0とした。

Fig.2 CAD model for a targeted living environment

3. 結果

3.1 転倒時の頭部傷害データベース

3.1.1 基準面より下方に衝突面がある場合

基準面より下部に衝突面がある場合の転倒シミュレーションでは、衝突面から見た基準面の高さ(以後、基準面高さ)を10cmから120cmまで、子どもの足部位置と基準面の縁間の距離(以後、足部-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、本研究では頭部が最初に衝突面に接触したときのHIC値を計算する。

基準面高さと足部-基準面縁間距離を変化させたときの危険度変化の関係を図3に示した。これより、基準面高さが55cm、足部-基準面縁間距離5cmのとき、最大危険度4.3となった。一方で、基準面高さが15~120cm、足部-基準面縁間距離が85cmのとき最小危険度の0.02となった。また、足部-基準面縁間距離が95cmを超えたところで、危険度は一定となった。

3.1.2 基準面より上方に衝突面がある場合

基準面より上部に衝突面がある場合では、子どもモデルの後方に衝突面があることを想定し、転倒シミュレーションを行った。解析は、基準面から見た衝突面の高さ(以後、衝突面高さ)を10cmから90cmまで、子どもの足部位置と衝突面の縁までの距離(以後、足部-衝突面縁間距離)を5cmから120cmまでそれぞれ5cm間隔で変更して転倒シミュレーションを行った。

衝突面高さと足部-衝突面縁間距離を変化させたときの危険度変化の関係を図4に示した。これより、衝突面高さが5cm、足部-衝突面縁間距離5cmのとき、最大危険度1.0となった。一方で、基準面高さが40cm、足部-基準面縁間距離が35~55cmのときなどで最小危険度の0となった。また、足部-衝突面縁間距離が105cmを超えたところで、危険度は一定となった。

3.2 室内空間の頭部傷害危険領域の可視化

対象とする室内空間のCADモデル内での家具類に対する高さや距離計算を行い、前節で構築した転倒条件を一般化した頭部傷害データベースから、室内空間の頭部傷害危険領域をマッピングし、それを可視化した結果を図5に示した。テーブルや椅子上からの転落では、床面における転倒よりもお

Fig.3 Relationship between distance and height from standing position to the collision surface in case of falling from reference surface to collision surface

Fig.4 Relationship between distance and height from standing position to the collision surface in case of collision to the collision surface

Fig.5 Visualization of hazardous location in targeted living environment

おむね危険度が高くなったが中心付近において危険度が低くなる傾向がえられた。特にテーブルの四隅において危険度が最も高かった。床面上からの転倒では、テーブルや椅子モデルの周囲で、周囲に何も無い場所に比べ危険度が低くなった。

4 考察

4.1 転倒時の頭部傷害データベースに関する考察

4.1.1 基準面より下方に衝突面がある場合

基準面より下部に衝突面がある場合において、最も頭部傷害危険度が高かった基準面高さ 55cm、足部－衝突面縁間距離 20cm における、子どもモデルの転倒挙動を図 6 に示す。子どもモデルは基準面上で後方に転倒し、基準面下へ転落する。このとき、基準面の縁と下腿部が接触し、回転運動を伴って床面へ転落する。転落後、まず頭部が床面に接触し、続いて背中が床面に接触する。このため頭部傷害危険度が高かったと思われる。一方で、最も頭部傷害危険度が低かった基準面高さ 55cm、足部－衝突面縁間距離を 75cm としたときの転倒挙動を図 7 に示す。この条件における転倒では、子どもモデルはテーブルの下へ転落することではなく、また、頭部は床面に接触することはない。

また、子どもモデルの立ち位置を基準面の端点 0cm から 120cm まで、基準面－衝突面間高さを 10cm から 120cm まで変化した場合の HIC 変化を表 2 に示した。子どもの足部と基準面縁までの距離が短い場合では、子どもは基準面から衝突面へ転落するために高い HIC 値を示した。子どもの足部と

衝突面縁までの距離が 30cm の場合では、基準面－衝突面間高さが高くなるにつれて HIC 値が下がっている。これは、基準面縁に子どもの下腿部や大腿部が接触することにより、体幹全体の回転運動が発生し、頭部が衝突面へ衝突する際には、体幹全体が 1 回転し頭部が直接床面に打撃しなかったからであると考えられる。また、同様の傾向が子どもの足部とテーブルの縁の距離が 5cm から 45cm の間でもみられた。さらに衝突面までの距離が長くなり 120cm 付近になると、基準面上での転倒となるので床面転倒時と同様の値を示し、一定値となった。

4.1.2 基準面より上部に衝突面がある場合

テーブルの高さ 15cm、子どもの足部位置と衝突面縁までの距離を 20cm としたときの転倒挙動を図 8 に示す。このように、衝突面の高さが低くかつ立ち位置が衝突面に近い場合には、下腿部や大腿部がテーブルの縁と接触し、この点で回転運動をしながら転倒する。また、最初に臀部が床面に接触した後、頭部が接触している。

また、衝突面高さ 40cm、衝突面縁までの距離を 75cm としたときの転倒挙動を図 9 に示す。このとき、子どもの頭部は直接衝突面縁へ衝突している。このような場合、衝突面縁による頭蓋骨骨折などの危険性があるように考えられるが、この条件における HIC 値は 250 となり、3 歳児の耐性値である 900 を大きく下回った。これは、HIC 値が頭部の加速度応答のみから危険度を評価しており、応力集中などを考慮に入れることができていないことが原因であると考えられる。その

Fig.6 The falling behavior in case of falling from reference surface to the collision surface (height:55cm distance:20cm)

Fig.7 The falling behavior in case of falling from reference surface to the collision surface (height:55cm distance:75cm)

Table.2 Simulation result when the child model fall from upper position

		Distance between the child and the edge of the reference surface (cm)				
		0	30	60	90	120
The height of the table (cm)	30	1090	2190	82	340	670
	60	1710	1410	230	310	670
	90	2890	840	530	300	680
	120	2940	560	860	320	670

Fig.8 The falling behavior from under position (height:15cm distance:20cm)

Fig.9 The falling behavior from under position (height:40cm distance:75cm)

Table.3 Simulation results in case that the child model is fallen from under position

		Distance between the child and the edge of the collision surface (cm)			
		30	60	90	120
The height of the contact surface (cm)	30	340	23	150	630
	60	4	60	670	630
	90	490	640	670	630

ため、衝突面の角特性の影響を今後は調査する必要がある。

次に、衝突面縁からの距離を 30cm から 120cm まで、衝突面高さを 30cm から 90cm まで変化させた場合における HIC 値変化を表 3 に示した。前節の基準面から転落するケースと比べて、HIC 値が低いことが分かる。これは、衝突面と頭部間の落差が短いため、衝突速度が低いためであると思われる。また、極端に低い HIC 値を示しているのは、衝突面縁に胸部や腰部が接触し、そのまま座位姿勢となり、頭部が直接衝突面に衝突せず、急激な加速度変化が起きないためであると考えられる。

4.2 室内空間の頭部傷害危険領域の可視化に対する考察

まず、テーブル上に関しては、四隅の危険度が非常に高くなった。これは、4 方向への転倒を考えると、テーブルの下へ転倒する割合が他の場所に比べて高いことが原因であると考えられる。また、テーブルの高さが高くなっても危険領域の大きさは増加せず、椅子などの面積の小さいところで危険領域は増加している。これは、危険度の算出方法が 4 方向への転倒の平均を取ったために、四隅の危険度が高くなったのと同様に、面積が狭い場所のほうがテーブルや椅子の下へ転落する割合が高くなるからであると考えられる。

床面上からの転倒の場合では、テーブルや椅子付近では、何もなかったところに比べ、危険度は低くなるという傾向を得た。これは、頭部傷害危険度を加速度のみで評価していることから、テーブルや椅子が存在する方向へ転倒する場合では、頭部の衝突速度は低いままテーブルや椅子へ頭部が衝突することが原因であると考えられる。

5. 結言

本研究では、多種多様な生活空間における転倒事故における頭部傷害の危険領域を簡便かつ高速に可視化できる手法を開発した。具体的には、生活環境内における転倒条件を一般化し、あらかじめ転倒事故時における頭部傷害データベースを構築した。さらに、各々の環境下の CAD モデルにおいて転倒条件のみを算出し、データベースより引用した傷害危険度を CAD モデル上にマッピングすることにより、生活空間内における危険領域を可視化する手法である。

本手法により、設計者の経験では事前に察知することが出来ない生活環境内の潜在的で致命的な危険を可視化することができるため、本手法は生活環境の安全設計および消費者の情報提供に対して有用である。

今後の課題としては、マルチボディ解析では考慮することが困難な衝突面の形状と特性の頭部傷害危険度に及ぼす影響について有限要素解析により検討する必要がある。

参考文献

- (1)西田 佳史, 本村 陽一, 山中 龍宏, 子どもの事故予防のための事故サーベイランスシステムへの取り組み～確率的知識の抽出と活用～, 信学技報, vol.17, No.6, (2005)
- (2)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, (2008), 93-99
- (3)Eppinger, et al, Development of Improved Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems – II, NHTSA, (1999)