309 逆問題的手法による子どもの転落事故の状況推定法

The estimating method of the situation of child's downfall accident by inverse problem solution

鈴木 孝侑 (東工大院) 正 宮崎 祐介 (金沢大)
 正 丸山 剛生 (東工大) 正 宇治橋 貞幸 (東工大)
 正 持丸 正明 (産総研) 西田 佳史 (産総研) 河内 まき子 (産総研)

Takayuki SUZUKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo
 Yusuke MIYAZAKI, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa
 Takeo MARUYAMA, Sadayuki UJIHASHI, Tokyo Institute of Technology
 Masaaki MOCHIMARU, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2-41-6, Aomi, Koto-ku, Tokyo
 Yoshifumi NISHIDA and Makiko KOUCHI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

In this study, the method to infer the situation of child's downfall accident by computer simulation was constructed. In the simulation, child multi-body model based on real children's body dimensions and actual spiral stairs model were used. Objective function based on a fall point after the accident was determined and a response surface was constructed to estimate the relationship between the objective function and input variables of the simulation. The circumstances of pre-accident were inferred by using genetic algorithm. The method was applied to a real accident and the estimated situation approximately corresponded to the real accident. The method showed the possibility to estimate the accident circumstances in a real accident.

Key Words: Multibody Dynamics, Child's accident, Inverse problem solution, Safety Engineering

A.1 緒論

子どもの行動範囲は成長により急速に拡大し、事故に遭遇する頻度が増加する。不慮の事故は死因の第1位であるだけでなく、死に至らずとも重傷を負うことも多く効果的な対策が必要である。現在、子ども事故サーベイランスシステムによる事故情報の収集が進められているが、目撃証言の少なさや曖昧さなどから、事故の結果の情報しか入手できない場合が多く、原因特定が困難である。事故の発生過程及び原因の特定のためには、事故の結果からあり得る事故形態を推定する手法が必要となる。本研究では、発生頻度が高く、かつ受傷程度が重くなる場合が多い転落事故について、実測された身体寸法に基づく子どものマルチボディモデルを用いて転落事故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ための手法の構築を目的とした。

A.2 逆問題的手法による転落事故の状況推定法の構築

実事故として遊具の螺旋階段における転落事故を取り上げ、被害幼児を模擬した5歳児のマルチボディモデルおよび螺旋階段モデルを構築した。これらを用いて転落直前の子どもマルチボディモデルの姿勢による転落挙動の違いを比較し、姿勢を考慮したシミュレーションが必要であることを示した。

次に、事故の結果の情報のひとつである子どもの転落位置を用いて、転落開始位置と転落方向を推定し、これらを基にした事故シミュレーションを行うことで、転落挙動を推定する手法を構築した。この状況推定法の妥当性を検証するため

に、一例の転落シミュレーションを例題として実施し、推定された事故状況と実際を比較した。その結果、外部環境との衝突が単純な転落では実際とほぼ同じ状況が推定でき、複雑な転落では衝突形態に違いがあるものの定性的に類似した挙動を推定できた。このことから、本推定法は複雑な転落挙動の推定には精度に課題が残るものの、方法論は妥当であり、単純な転落挙動であれば十分に推定できることを示した。また、推定精度向上には、モデルの外形状や接触特性により詳細なデータを用いるなどの改良が必要であることがわかった。

A.3 状況推定法の実事故への適用

最後に、実事故に対して状況推定法を適用し、事故状況の推定を試みた。転落直前の子どもマルチボディモデルの姿勢を変えながら転落挙動を推定したところ、その中に転落挙動の中に事故状況によく合致するものが含まれており、本研究で構築した状況推定法は、実事故においても事故状況を推定できる可能性があることを示した。

Fig. A.1 Child's downfall simulation of spiral stairs

1. 背景と目的

子どもの行動範囲は成長により急速に拡大し、事故に遭遇する頻度が増加する。不慮の事故は死因の第1位⁽¹⁾であるだけでなく、死に至らずとも重傷を負うことも多く効果的な対策が必要である。現在、産総研や小児科医などにより子ども事故サーベイランスシステムによる事故情報の収集が進められているが、目撃証言の少なさや曖昧さなどから、事故の結果の情報しか入手できない場合が多く、原因の特定が困難な事例がある。事故の発生過程及び原因の特定のためには、事故の結果からあり得る事故形態を推定する手法が必要となる。本研究では、発生頻度が高く、かつ受傷程度が重くなる場合が多い転落事故⁽²⁾について、実測された身体寸法に基づく子どものマルチボディモデルを用いて転落事故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ための手法の構築を目的とした。

2. モデル構築と遊具事故シミュレーション

はじめに、渡辺ら⁽³⁾の手法を用い、Fig.2.1 に示すような全身の体節を楕円体近似した子どもマルチボディモデルを Fig.2.2 のような流れで構築した。まず、Table 2.1 に示した 40 項目の子どもの身体寸法データから関節位置・体節形状を定義した。本モデルは、全身を 17 体節 16 関節で構成する。慣性特性は、横井ら⁽⁴⁾のデータを基に算出された。接触特性は HybridIII ダミーを基に貫入量と力の関係から定義した。関節特性は回転角とモーメントの関係でモデル化し Yang⁽⁵⁾らのデータを基に定義した。用いた接触特性および関節特性の一部を Fig.2.3, Fig.2.4 にそれぞれ示す。

次に、外部環境モデルとして、実際に事故があった螺旋階段のモデルを CAD データから構築した。Fig.2.5 に螺旋階段モデルを示す。

これらのモデルを用いて、Fig. 2.6 のように直立、右脚挙上、頸部屈曲を子どもマルチボディモデルの初期姿勢とし、転落挙動の違いの比較シミュレーションを MADYMO ver6.3(TNO-Automotive)により行った。その結果、Fig. 2.7 のように姿勢は転落挙動に影響することがわかり、姿勢を考慮したシミュレーションを行う必要があるといえる。

Fig. 2.1 Body shape of Child multi-body model

Fig. 2.2 Flow of constructing child model

Table 2.1 Dimensions of the body

ID	Dimension	ID	Dimension
D ₀	Weight	D ₂₀	Upper limb length
D ₁	Stature	D ₂₁	Forearm circumference
D ₂	Head length	D ₂₂	Forearm breadth
D ₃	Head breadth	D ₂₃	Radial-styilion length
D ₄	Head height	D ₂₄	Hand length
D ₅	Tragion to back of head	D ₂₅	Hand breadth
D ₆	Tragion to top of head	D ₂₆	Index finger depth
D ₇	Neck circumference	D ₂₇	Wrist circumference
D ₈	Lateral neck breadth	D ₂₈	Thigh circumference
D ₉	Biacromial breadth	D ₂₉	Trochanteric height
D ₁₀	Chest depth	D ₃₀	Calf circumference
D ₁₁	Chest breadth	D ₃₁	Tibiale height
D ₁₂	Suprasternale height	D ₃₂	Foot length
D ₁₃	Abdominal depth	D ₃₃	Foot breadth
D ₁₄	Waist breadth	D ₃₄	Lateral malleolus height
D ₁₅	Hip circumference	D ₃₅	Ankle circumference
D ₁₆	Hip breadth	D ₃₆	Sitting height
D ₁₇	Iliocristal height	D ₃₇	Elbow height, sitting
D ₁₈	Crotch height	D ₃₈	Shoulder-elbow length
D ₁₉	Upper arm circumference	D ₃₉	Middle finger length, dorsal

Fig. 2.3 Forearm contact characteristic

Fig. 2.4 Neck joint characteristics

Fig. 2.5 Spiral stairs model

Fig. 2.6 Initial posture

(Upright(Left),Leg flexed(Center),Head bent down(Right))

Fig. 2.7 Downfall behavior

(Upright(Left),Leg flexed(Center),Head bent down(Right))

3. 逆問題的手法による転落事故の状況推定法の構築

状況推定法の構築手順として、まず事故の結果情報を基に目的関数を作成した。これには文献⁽⁶⁾を参考とし、頭部・胸部・腹部体節について、シミュレーションから計算された転落位置と目標となる実事故における転落位置との相対距離の2乗和とした。次に応答曲面法⁽⁷⁾によりパラメータスタディの結果を基に入力変数と目的関数との関係を数式化した。最後に、GAにより目的関数を最適化する入力変数を探索的に求めた。

本推定法の妥当性を検証するために、一例の転落シミュレーションを例題とし、提案する状況推定法によりその初期状態を推測することとした。まず、単純な転落挙動として螺旋階段1段目からの転落を考えた。Fig. 3.2~3.3に示すように、初期位置12箇所、転落方向4方向として、シミュレーションを48通り行い、その結果から3次多項式により近似された応答曲面を算出し、それをGAにより最適化することにより初期状態を推定した。なお、GAの計算条件は、世代数25、個体数10、さらに1点交叉を行うこととした。

推定された転落挙動は例題として用意したシミュレーション結果とよく類似した。初期位置、転落方向および転落位置の目標値との誤差をTable3.1に、各体節の最大加速度をTable3.2に示す。以上より、構築した状況推定法の方法論は妥当であると考えられる。また、応答曲面法により、GAのみで最適化を行った場合の5分の1にまで計算量を低減できた。

次に、複雑な接触を伴う転落挙動として、螺旋階段3段目からの転落について検討した。目的関数の値がより複雑に変化すると考えられたため、パラメータスタディの粒度を分けた。Fig. 3.5~3.6に示すように、まず初期位置12箇所、転落方向4方向として1回目の大域的なパラメータスタディを行った。この結果を基に入力変数の変動範囲を狭め、水準間隔を半分にし、初期位置25箇所、転落方向5方向としてパラメータスタディを実施し、この結果から応答曲面を作成しGAにより最適化した。こうして推定された転倒挙動は、頭部と螺旋階段1段目との衝突形態が例題のものとは異なったものの、定性的に類似した転落挙動となった。初期位置、転落方向および転落位置の目標値との誤差をTable3.3に、各体節の最大加速度をTable3.4に示す。以上より、複雑な形状の外部的環境との接触では推定精度が低下することがわかった。精度向上にはモデルの外形状・接触特性などに、より詳細データが必要と考えられる。

Fig. 3.1 Flow of construction of the estimating method

Fig. 3.2 Initial position of child multi-body model

Fig. 3.3 Fall direction of child multi-body model

(a) Initial position (b) Fall position

Fig. 3.4 Overlaid view of child models

(The estimated fall(blue), The actual(white))

Table 3.1 Error of initial position, fall direction, and fall position

Initial position [m]	Fall direction [deg]	Fall point of body segments [m]		
		Head	Torso	Abdomen
0.022	4.6	0.195	0.043	0.058

Table 3.2 Maximum linear acceleration at each body segment

Downfall behavior	Acceleration at body segment [m/s ²]		
	Head	Torso	Abdomen
Estimated	2015	669	652
Actual	2285	648	599

Fig. 3.5 Initial position of child multi-body mode

Fig. 3.6 Fall direction of child multi-body model

Table 3.3 Error of initial position, fall direction, and fall position

Initial position [m]	Fall direction [deg]	Fall point of body segments [m]		
		Head	Torso	Abdomen
0.088	4.9	0.287	0.136	0.050

Table 3.4 Maximum linear acceleration at each body segment

Downfall behavior	Acceleration at body segment [m/s ²]		
	Head	Torso	Abdomen
Estimated	1913	574	494
Actual	2450	608	507

(a) Initial position (b) Fall position

Fig. 3.7 Overlaid view of child models

(The estimated fall(blue), The actual(white))

4. 提案手法の実事故例への適用

構築した状況推定法を実事故に適用しその推定精度を検証した。事故情報は以下の通りである。5歳女児が本遊具の螺旋階段中央の柱に寄りかかっていたところ、バランスを崩し地面まで転落し、その際階段のどこかに背中が衝突し腎臓を損傷したが、頭部に受傷はなかったということである。このように実事故データは、事故状況を詳細に把握するための情報が欠損していることが多い。

そこで、この情報を基に状況推定法から転落挙動を推定した。まず、Fig. 4.1 に示すように、産総研の行った実験からシミュレーションにおける目標転落位置を定義した。次に、Fig. 4.2 のように螺旋階段3段目において中央の柱に背中あるいは右肩で寄りかかった姿勢を4種類定義し、各姿勢について本研究で対案する状況推定法を適用した。Fig. 4.3 のように、柱を中心とした円周上において、初期位置5箇所、転落方向5方向とし、4姿勢で合計100のシミュレーションを行った。本シミュレーション結果より応答曲面を作成し、GAにより最適化した。推定された転落挙動のうち、Fig. 4.4 に示した姿勢(a)では、螺旋階段1段目のへりと子どもモデルの左背面が衝突した。ここは人体では腎臓に近い部位である。さらに、頭部傷害指標値(HIC)を計算したところ、頭部の耐性限界値の1000を下回る211であり、重篤な頭部外傷の発生リスクは小さかったと推定された。これらは実事故の子どもの受傷状況とよく合致しており、本推定法による実事故状況の推定可能性が示唆された。

Fig. 4.1 Downfall Experiment(left) and fall position in simulation(right)

Fig. 4.2 Initial posture of child model

Child multi-body model

Fig. 4.3 Initial position and downfall direction of child multi-body model

Fig. 4.4 Estimated downfall behavior of posture(a) (Initial position(Left), Contact between back and stair edge(Right))

(a) Head

(b) Torso

Fig. 4.5 Linear acceleration (Downfall behavior of posture(a))

5. 結論

本研究では、子どもマルチボディモデルと螺旋階段モデルを用いた転落事故シミュレーションを利用して、事故データに欠損している事故発生過程の状況を推定する手法を提案した。本手法は、応答曲面法とGAを組み合わせ少ない計算コストで事故の結果情報から事故状況を逆問題的に推定する手法である。本手法を、実事故例に適用した結果、事故状況を推定できる可能性があることを示せた。

6. 参考文献

- (1). 厚生労働省, 人口動態統計年報主要統計表 (最新データ, 年次推移), (2005)
- (2). 東京都消防庁, 子どもの事故予防対策検討委員会報告書, 2006
- (3). 渡辺ら, 子どもマルチボディモデルの構築と遊環境の危険度可視化法に関する研究, ジョイントシンポジウム, 2006
- (4). 横井孝志, 渋谷侃二, 阿江通良, 日本人幼少年の身体部分係数, 体育学研究 31, (1986), 53-66
- (5). J.K.Yang Development and validation of a human-body mathematical model for simulation of car-pedestrian collisions, IRCOBI, (1997), 133-149
- (6). 伊藤ら, 子供歩行者人体 FE モデルの検証, 自動車技術会, 2007
- (7). 轟章, 応答曲面法, <http://florida.mes.titech.ac.jp/responsesurface.pdf>