A50 生体力学シミュレーションのための転倒データベースの構築

Development of Fall Database for Biomechanical Simulation

○ 加唐 寛征 (東理大 & 産総研) 西田 佳史 (産総研) Sang Min Yoon (延世大)
 正 宮崎 祐介 (金沢大) 正 溝口 博 (東理大 & 産総研) 山中 龍宏 (緑園こどもクリニック)

Hiroyuki Kakara^{1,2}, Yoshifumi Nishida², Sang Min Yoon³
 Yusuke Miyazaki⁴, Horoshi Mizoguchi^{1,2}, Tatsuhiro Yamanaka⁵

¹Tokyo University of Science, Noda, Chiba, Japan

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo, Japan

³Yonsei University, Incheon, Korea

⁴Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa, Japan

⁵Ryokuen Children's Clinic, Yokohama, Kanagawa, Japan

This paper describes the development of the fall database for a biomechanical simulation. First, data of children's daily activities were collected at a sensor home, which is a mock daily living space. The sensor home comprises a video-surveillance system embedded into a daily-living environment and a wearable acceleration-gyro sensor. Then, falls were detected from sensor data using a fall detection algorithm developed by authors, and videos of detected falls were extracted from long-time recorded video. The extracted videos were used for fall motion analysis. A new CV algorithm was developed to automate fall motion analysis. Using the developed CV algorithm, fall motion data were accumulated into a database. The developed database allows a user to perform conditional searches of fall data by inputting search conditions, such as a child's attributes and fall situation. Finally, a biomechanical simulation of falls was conducted with initial conditions set using the database.

Key Words: Childhood Injury Prevention, Fall Database, Fall Dynamics, Biomechanical Simulation

1. 緒論

スポーツやレジャーといった余暇活動は、一般に日常での活動よりも傷害リスクが大きい。例えばアスレチック遊具のように高所に登る遊具では、使い方を誤れば落下事故などが発生する。またラグビーなどのフルコンタクトスポーツでは、防具を着けていても傷害を負う危険性がある。事故発生時の傷害リスクを低減するために、スポーツやレジャー施設で使用されるハードウェアは、人間のダイナミクスに基づいて設計することが重要となる。特に、少子高齢社会である現在、今いる子どもたちを健康に成長させることがこれまでも増して求められており、子どもの余暇活動中の不慮の事故による傷害リスクを減らしていく必要がある。

子どもの不慮の事故の中で、最も頻発し、医療費を最も多く消費しているのは転倒であり、大きな社会的負担を与えている。日本国内において2009年度に0～14歳の子どもが傷害を負い病院を受診した事例のうち、半数以上は転倒・転落によるものである⁽¹⁾。またアメリカでは、傷害や死亡に対する医療費の25%以上を転倒による傷害が占めていることが明らかとなっている⁽²⁾。そこで、本研究では、子どもの不慮の事故の中でも特に、最も頻発かつ医療費を最も多く消費している転倒に着目し、運動場や日常空間における転倒による傷害のリスクを低減する技術の開発を目的とする。

転倒による傷害リスク低減には、以下の3つのアプローチが考えられる。1) 子どもをトレーニングすることにより歩行能力やバランス感覚を鍛え、転倒しない体を作る、2) 地面の障害物や凹凸を排除するなどの環境操作により転倒させない、3) 地面の衝撃吸収性能を向上させる等の環境操作により転倒しても重度の傷害を発生させない。1)、2) はそもそも転倒発生を未然に防ぐアプローチであり、一見有効な手法と思える。例えば、高齢者の場合には地面の

滑りやすさ状態の操作などといった環境操作や、トレーニングによる身体能力やバランス感覚の低下抑制により、転倒発生を未然に防ぐことは可能と考えられる。しかし、子どもの場合は状況が異なる。まず転倒はハイハイから歩行への発達の過程において自然発生するものであり、また子どもは平坦で障害物のないスペースでも転倒するため、転倒発生を未然に防ぐことは殆ど不可能であると言える。さらに子どもの場合、転倒の危険性認知力の発達という観点からは、転倒させないということが一概によいとは言えない。これらのことより本研究では1)、2)のアプローチは子どもの転倒を考える上では不適切と考え、3)のアプローチを可能とする技術の開発を進めている。

転倒による傷害のリスクを低減した環境を開発するためには、転倒による傷害の程度を評価する必要がある。これまでに有限要素モデルを用いた転倒シミュレーションの研究が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。このシミュレーションでは身体特性を反映したモデルを用いることで骨折などの現象を再現できる。一般に、有限要素法を用いたシミュレーションでは転倒衝突前後の極めて短い時間のみを再現するため、転倒衝突時の姿勢や速度を初期値として与える必要がある。防御動作などの能動的動作を伴わない転倒を想定する際は、単純な物理法則を用いたシミュレーションにより衝突時の姿勢や速度を推定し、それらを初期値として用いることができる。しかし、実際の転倒は防御動作など能動的動作を伴うため、衝突時の姿勢や速度は単純な物理法則を用いて推定したものとは大きく異なる。シミュレーションを正しく行うためには実際に起こった転倒時の動力学データをシミュレーションに反映させる必要があるが、今まで高齢者の場合も含めて実際の転倒時の動力学データは存在しなかったため、現実の転倒現象を反映した転倒シミュレーションは困難であった。

これまでに、転倒に関する研究は数多くなされている。例えば転倒検出するシステムを開発する研究や⁽⁵⁾⁽⁶⁾、転倒

の発生率, 原因, 発生環境について理解することで転倒の発生を予防するという研究⁽⁷⁾がされてきた。しかし, これらは高齢者の転倒に着目したものであり, 子どもの転倒についての研究は未だ十分になされていない。さらに, 実際の転倒の動力学挙動については高齢者も含め未だ解明されておらず, これを明らかにして転倒による傷害リスクを低減していくことが急務となっている。

そこで本研究では, 現実にかかる能動的動作を伴った転倒をシミュレーションで再現するために必要となる, 実際の転倒時の動力学データに関するデータベースを構築することを目的とする。本稿では, 部屋に取り付けられた複数のビデオカメラと, 子どもに取り付けた加速度・ジャイロセンサを用いて, 転倒データベースを構築する技術を述べる。具体的には, 行動計測システム, センサ情報を用いた転倒検出アルゴリズム, 画像処理による姿勢推定アルゴリズムを述べ, 被験者実験によって実際に構築した転倒データベースを報告する。

2. 行動計測システムと被験者実験

Fig. 1 Behavior Measuring System

本研究では非意図的な転倒の動力学データを収集する必要がある。そこで, 今回は子どもの日常行動の中で非意図的に起こる転倒のデータを収集するためのシステムとして, 図1に示すように通常の住宅内のリビング・ダイニングに行動計測システムを構築した。このような日常生活空間に近い環境下で行動計測を実施することで, 子どもから自然な行動を誘発することができる。

2.1 行動計測システム

計測システムは12台のビデオカメラ, 子どもの体幹に装着された加速度・ジャイロセンサ, 及びそれらを記録するPCで構成される。カメラは部屋のすべての位置でステレオ視を確保するように配置した。尚, 部屋全体を撮影するために魚眼レンズを装着したカメラを1台設置している。この計測システムの出力は以下の通りである。

- センサデータ (167Hz): 転倒検出に使用

- カメラ映像データ (12台, 各 30fps): 転倒姿勢解析に使用

このシステムではPCセンサデータを受信する毎にその瞬間の各カメラのフレーム番号をセンサデータの末尾に付加することで両データの同期を実現した。両データのサンプリング周期は異なるが, 最大で 27ms 程度の誤差であり, 今回の研究目的を達成する上では問題ないと考えられる。

計測中の傷害事故発生防止のため, 以下のような安全対策を施している。

- 壁の角やドアの蝶番ヘカバーを装着
- コンセントカバーを装着
- 計測スペースとキッチンとの間にベビーゲートを設置

2.2 被験者実験

被験者実験は以下の条件下で行う。

- 計測対象: 1~2歳の歩き始めの子ども
- 計測時間: 1時間
- 1計測当たりの対象人数: 1人

計測対象者は転倒が多いと思われる歩き始めの年齢層とした。計測時間は子どもの体力や集中力を考慮し1時間とした。計測では最初に, 保護者にデータの記録と公開に関する同意書にサインしてもらい, その後データベースの検索条件として用いるために子どもの属性(月齢, 身長, 体重, etc.)を記録し, 子どもに計測用衣服(図2)を着てもらった。この計測用衣服は体に過度な負荷をかけることなくセンサを体表に安定して固定する役割を果たす。また画像処理にて転倒姿勢解析をする際に上半身の範囲を明確に示す役割も果たす。行動計測中, 子どもは部屋にあるおもちゃなどを用いて普段と同じように保護者と自由に遊ぶ。本研究で扱う転倒は非意図的に発生した転倒であるため, 故意に転倒させる実験は実施しない。

Fig. 2 Experimental Garment

2.3 システム出力データの例

開発した行動計測システムでは図3のような出力が得られる。現在までに11ヶ月~28ヶ月の8人の子どもの行動計測を実施し, 69回分の転倒を記録した。

3. 転倒検出アルゴリズム

行動計測により子どもの行動データを得たら, 加速度・ジャイロセンサデータを用いて長時間の映像から転倒映像を抽出する。本研究では転倒映像抽出を自動化するため, 新たに図4に示す転倒検出アルゴリズムを開発した。先行研究においても転倒検出アルゴリズムは開発されている

Fig. 3 Example of Behavior Data

Fig. 4 Fall Detection Algorithm

が、これらをそのまま子どもの転倒に適用することは困難である。子どもの転倒姿勢は大人とは大きく異なるため、子どもの転倒特徴を考慮した転倒検出アルゴリズムの開発が不可欠である。筆者らの詳細な分析によると転倒の特徴はセンサから得られる全てのデータに完全に同時には現れない場合が多く、本研究ではこの影響を打ち消すために加速度や角速度の時間積算値を計算する手法を開発した。転倒時、センサデータには急激な値の変化が見られるが、特に G_y (体の上下方向), G_z (体の前後方向), ω_x (鉄棒での回転方向) にその特徴が見られる。歩き始めの子どもの尻餅を突く様な転倒の特徴は G_y に強く現れ、一方、活発な子どもの前に大きく投げ出されるような転倒の特徴は G_y や ω_x に強く現れる。また、転倒の特徴のこれらの値への分布の仕方は各転倒で異なる。このように、子どもの場合、転倒姿勢に多様性があり、センサデータは転倒姿勢に大きく影響を受ける。

上述した子どもの転倒の特徴を考慮し図4に示す転倒検出アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは、上述の3つの値に現れた転倒の特徴量を加算して転倒の有無を判断するパラメータである転倒特徴強度 F を計算する。まず各データをセンサで得られる最大値で割ることで無次元化し、それらを足した上で最大値が1になるように正規化することで F を計算する。ただし、各データに転倒の特徴が現れるタイミングには最大で 200[msec] 程度の差がある

ため、240[msec] 間のデータを積算することで、3つのデータに現れた転倒の特徴量を加算した指標を算出している。 F が閾値を超えたら転倒発生と判断し、センサデータの末尾に付加されている各カメラのその瞬間におけるフレーム番号を参照することで、前後2秒ずつの転倒映像を自動的に抽出する。

図5は実際に G_y , G_z , ω_x を用いて F を計算した結果を表している。 F を見ると赤線で示される閾値を大きく上回る個所があり、図5の下に示した対応個所のキャプチャ映像を見ると、実際にこの個所で転倒が発生したことが確認できる。

Fig. 5 Calculation Result

4. 画像処理を用いた転倒姿勢の自動解析

Fig. 6 Algorithm

本研究では転倒映像から動力学データを得るために、コンピュータビジョンを用いた自動転倒姿勢解析技術を開発した。以前の報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾では手作業でステレオ視の対応点を与えることにより転倒動作を3次元化していたが、大規模なデータベースを構築するためには処理の高速が不可欠である。そこで、新たに自動転倒姿勢解析を可能にする技術を開発した。この技術では子どもの体にマーカを付けることなく自動的に体の主軸の動きを抽出できるため、子ども

の自然な行動を阻害しないという利点がある。図6のアルゴリズムに示されるように色情報と動きの情報を用いて頭部領域と腹部領域をトラッキングすることにより、体の主軸の動きを抽出する。以下、詳細を述べる。

初期化

抽出された転倒映像の最初のフレームを用いて、マウスでトラッキングする対象となる頭部領域と腹部領域を指定する。それぞれの領域で図7のようにヒストグラムを作成するが、黒いという特徴がある頭部領域は輝度のヒストグラムを作成し、黄緑という特徴がある腹部領域は色のヒストグラムを作成する。

Fig. 7 Histogram

確率マップを作成

Fig. 8 Probability Map

初期化で作成したヒストグラムを用いて、現在のフレームの各ピクセルについて、その色(腹部の場合)や輝度(頭部の場合)の初期化領域内における発生頻度をマッピングする。これにより作成された確率マップでは、トラッキングすべき対象と色や輝度が似ている場所が白く表示される。

差分

Fig. 9 Difference

さらに、1フレーム前の画像と現在のフレームとの差分を取り、差分がゼロとなったピクセルには動く物体が存在しないと判断し、対応する確率マップのピクセルにゼロを書き込むと、図8が図9のように変換される。

ノイズ低減

図9のように作成された画像を、閾値処理により2値画像に変換する。さらに、モルフォロジー演算により白い個所を膨張させることにより、ノイズを低減する。その結果、図10のような画像が作成される。

図10で赤い四角形で示されるのはトラッキング対象の探索範囲である。探索範囲は前フレームで計算されたトラッキング対象のピクセル位置を中心とした、一辺の長さが $\frac{5}{3} \times \sqrt{\text{count}}$ の正方形である。ここでの count とは、前フレームで探索範囲内において白くなっていたピクセルの合計数である。

Fig. 10 Noise Reduction

重心を計算

探索範囲の中で白くなっているピクセルの重心位置を計算し、それをトラッキング対象の位置とする。その結果、図11のように体の主軸の動きを抽出が抽出可能となる。

Fig. 11 Motion of Body Main Axis

5. 転倒データベースの構築

現在までに生後11ヶ月～28ヶ月まで8人の子どもの行動計測を行い、69回分の転倒データを蓄積することでデータベースを構築した。開発したデータベースには、各転倒の動力学値時間変化データ、転倒して着地する瞬間の動力学値、転倒者の属性、ビデオから得た転倒状況(着地部位、直前行動、転倒原因)などが記録されている。さらに、本研究では転倒データベースを閲覧するためのソフトウェアも開発した。

5.1 データベースの機能

データベースの閲覧ソフト(図12参照)では左側に検索条件やグラフの表示に関する設定を行うボックスがあり、右には検索された転倒のデータを記載したテーブルがある。画面下には検索条件に合う動力学データを用いた確率分布が表示される。以下でそれぞれの機能について述べる。

転倒者の属性や転倒状況の条件付き転倒データ検索機能

以下の項目について条件を付けた上で転倒データを検索することができる。

- 転倒者の属性：月齢、性別、身長、体重、利き手、利き足

Fig. 12 Database Browser

- 転倒状況：着地部位，直前行動，転倒原因

検索条件を指定し検索を実行すると，表及び確率分布のグラフが条件に適合するデータのみを用いて自動的に再描画される。

検索された転倒動力学値の確率分布可視化機能

転倒の速度，加速度，角度についての確率分布を自動的に計算し，それらをそれぞれ可視化する機能を実装している。条件を変えて検索される度に，確率分布が計算されグラフが更新される。また，本閲覧ソフトではヒストグラムと累積相対度数分布の2種類の確率分布を可視化できる。累積相対度数分布（パーセントイル曲線）は，横軸の値以下の範囲に全体の何%の度数が分布しているかということ縦軸で表している。

検索された転倒状況の確率分布可視化機能

別ウィンドウにて転倒状況の確率分布を可視化することができる。

個別の転倒動画及び姿勢解析結果動画の表示機能

表の任意のセルを指定することで，そのセルに対応する転倒動画，及び姿勢解析結果の動画を表示することができる。

動力学値の確率分布及び時間変化データの出力機能

テーブルに表示されている任意の転倒のセルを指定することで，対応する転倒の速度や加速度，角度の時間変化データを出力できる。

開発したデータベースと閲覧ソフトはキッズデザインの輪 (<http://www.kd-wa-meti.com>) より公開中である。

5.2 生体物理シミュレーションへの適応

本節では，転倒データベースを用いた転倒シミュレーションについて述べる。データベースを用いることで実際の転倒時の姿勢や速度をシミュレーションに反映させることができ，実際に起こり得る転倒の再現が可能となる。表1は床材メーカーが本データベースを利用して転倒シミュレーションを実施し⁽¹⁰⁾，床材の衝突安全性を評価した結果である。ここでは手から着地した転倒の中で頭部速度が最大となる転倒のデータをデータベースから得てシミュレーションを行い，床材の違いによる骨折発生確率の違いを定量的に表している。

Table 1 Event Probability of Cranial Bone Fracture

	コンクリート	木質 フローリング	クッション フロア	衝撃吸収 フローリング
最大 主ひずみ	0.00466	0.00414	0.00270	0.00148
骨折確率	12%	10%	5%	2%

6. 結論

本研究では子どもの転倒データベースを構築することを目的として，まず子どもの日常行動を計測するシステムを構築し，被験者実験により行動計測を実施した。得られた行動データから転倒映像を抽出するために転倒検出アルゴリズムを開発した。抽出された映像を用いて転倒姿勢解析を行い，転倒の動力学データを得た。転倒姿勢解析のためにコンピュータビジョンを用いた自動転倒姿勢解析技術を開発し，身体の主軸の動きの抽出を可能にした。現在までに生後11ヶ月～28ヶ月の8人の行動計測を行い69回分の転倒データを得て，転倒データベースを構築した。本研究で開発したデータベースは床材メーカーにおいてすでに転倒シミュレーションで使用された。今後，開発した行動計測システムを用いて被験者実験を継続し，またコンピュータビジョンによる自動転倒姿勢解析の改良を行い，データベースの充実を図る。自動転倒姿勢解析技術により行動計測から転倒動力学データ取得までの処理速度が向上するため，より大規模なデータベースの構築が可能となる。また転倒だけではなく生活全体の動力学データを構築していく，身体能力変化の自動検出などを可能にしていく予定である。

参考文献

- [1] 独立行政法人産業技術総合研究所，「平成21年度中小企業支援調査安全知識循環型社会構築事業報告書」，(2010)
- [2] Miller TR, Romano EO, Spicer RS. The cost of childhood unintentional injuries and the value of prevention. The Future of Children [issue on Unintentional injuries in childhood], 2000, 10:137-163
- [3] Y. Miyazaki, Y. Murai, Y. Nishida, T. Yamanaka, M. Mochimaru and M. Kouchi. "Head Injury Analysis In Case of Fall from Playground Equipment Using Child Fall Simulator"; The impact of Technology on Sport, Vol. III, pp.417-421, 2009
- [4] Y. Miyazaki, Y. Nishida, Y. Motomura, T. Yamanaka and I. Kakefuda. "Computer Simulation of Childhood Head Injury Due To Fall From Playground Equipment"; The 2nd Asia Pacific Injury Prevention Conference, November 2008
- [5] A. K. Bourke, J. V. O'Brien and G. M. Lyons. "Evaluation of a threshold-based tri-axial accelerometer fall detection algorithm"; Gait and Posture, Vol. 26 Issue 2, pp. 194-199, November 2006
- [6] T. Zhang, J. Wang, P. Liu and J. Hou. "Fall Detection by Embedding an Accelerometer in Cellphone and Using KFD Algorithm"; IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 6 No. 10, pp. 277-284, October 2006
- [7] S. Robinovitch, F. Feldman, D. Wan, O. Aziz and T. Sarraf. "Video recording of real-life falls in long term care provides new insight on the cause and circumstances of falls in older adults"; Proceedings of the XIX Conference of the International Society for Posture & Gait Research Bologna, pp. 80, June 2009
- [8] 加唐 寛征，西田 佳史，溝口 博，「転倒動力学値確率分布データベースの開発」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'2011 論文集，2P2-K09, May 2011
- [9] H. Kakara, Y. Nishida, Y. Miyazaki, H. Mizoguchi, T. Yamanaka, "Development of Database of Fall Dynamics Probabilistic Distribution for Biomechanical Simulation"; The Proceedings of The 2011 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods, pp. 82-88, July 19 2011
- [10] 永大産業株式会社，「子どもの転倒時のデータ収集と，衝撃吸収性能を備えた床における転倒衝突時の子どもへの影響についての検証」，平成22年度キッズデザイン製品開発支援事業 共創プロジェクト報告集，April 2011