

ドミノ倒しのビジュアルシミュレーション

上田 篤史[†] 藤代 一成[‡] 大野 義夫[‡]

[†] 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 開放環境科学専攻

[‡] 慶應義塾大学 理工学部 情報工学科

1 背景と目的

コンピュータグラフィックスでのシミュレーション表現は、その多くが対象とする現象によって手法が異なっている。すべてが厳密な物理的原理に則しているわけではないが、人が見る分には現実と相違ないレベルに達しており、現在も表現の多様化について多くの研究が行われている。物理法則に厳密に従うシミュレーションは、結果こそ正確であるものの処理にかかる時間が膨大であり、処理の軽減に対して汎用的に適用できる解法の策定が困難であるため、特別な場合での処理が必要となってくる。例えば剛体のシミュレーションについては、汎用的に用いられる基本アルゴリズムは、物理法則を離散的に扱う手法がほぼ確立されているが [1]、さらに状況に応じて、特化した処理も必要とされ、表現の正確さや効率の両面で研究の対象となっている。

またシミュレーションには、表現の厳密さだけでなく娯楽としての役割や、人にとっての見やすさを追求する側面もあり、ビジュアルシミュレーションとして楽しむための表現方法も重要視されている。

本研究では、ドミノ倒しを対象として、倒れる様子が観察できるビジュアルシミュレーション作成に特化したアルゴリズムを提案する。シミュレーションの処理にリアルタイム性、ユーザ入力についてインタラクティブ性をもたせるために、ドミノ倒しの性質上避けられない膨大な個数の物体の処理について、個別の状態定義によって物体同士の相互間処理や移動などの計算量の軽減を目指す。衝突判定の軽減については多くの研究が行われているが、ほとんどが物理的な厳密さを重視したものであり [2]、人間の目で見えた結果に重点をおいているわけではない。本稿では、見た目に重点をおきながら、シミュレーションをリアルタイムに近づけるための処理の軽減を行う。

2 手法

本アルゴリズムでは、衝突判定、移動などのドミノ牌の相互間処理を軽減するために、ドミノ牌について便宜上の方向性、状態の定義を利用する。

2.1 番号

● 通し番号

シミュレーション上で配置するドミノ牌には、配置の段階で区別のための通し番号をもたせた。衝突の対象を限定して相互間の処理を軽減するため、各ドミノ牌には、自身にぶつかる可能性のある後方の牌番号 1 つと、自身がぶつかる可能性がある前方の牌番号を最大 2 つまでを保持させている (図 1)。

● 頂点番号

ドミノ牌は対称性のある物体であるが、その 8 頂点に番号を割り振り区別している。頂点の区別によって前方と後方、牌の上下を区別し、回転の方向と倒れる方向とを事前に決定しておくことで、各ドミノ牌における衝突判定を前面の一部分に限定し、処理を軽減している (図 2)。

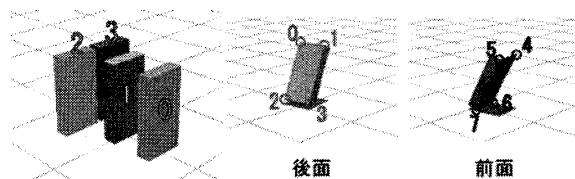


図 1: 前後の番号

図 2: 前後面と頂点番号

2.2 状態

ドミノ倒しを剛体シミュレーションで厳密に取り扱った場合、目に見える範囲ではほとんど状態が変化しないにも関わらず、前方後方のドミノ牌によって位置が長時間確定せず、静止しない。そのため多くの処理を継続して行わなければならない。物体の個数に応じて、処理量が指数関数的に増大する。そこで、一定の条件によって便宜上早期に静止状態になるとみなし、一度静止した牌は、以降動作を行わないようにした。同様に、シミュレーション表現を実際の現象に近づけることを前提に、リアルタイムでのシミュレーションが可能となるよう処理を軽減するため、シミュレーション中のドミノ牌の状態を便宜上 5 つに分けて定義した (図 3)。

- 待機 (白): 後方から衝突されるまで。
全てのドミノ牌の初期状態。この状態では、位置の移動・回転は行わず、後方の衝突判定だけを行う。
- 初動 (赤): 後方から衝突され、前方に衝突するまで。
ドミノ牌に併進速度と回転速度が与えられる。この状態では、重心位置の移動・回転処理、および前方への衝突判定を行う。
- 併動 (緑): 前方に衝突し、一定距離に近づくまで。
初動での衝突は頂点でのみ起こるため、ドミノ牌の面同士の接触について、ある一定距離以内になるまで、併進を行うものとする。この状態では、重心位置の移動・回転処理と、前方との距離判定を行う。
- 終動 (青): 一定距離に近づき、静止するまで。
前方のドミノ牌との距離が一定以下となると、前方のドミノ牌に依らない回転運動を行う。この状態では、回転処理と前方との位置関係判定を行う。
- 静止 (黒): 一切の移動を行わない状態。

Visual simulation of domino toppling

[†]Atsushi Ueda, Graduate School of Science and Technology, Keio University

[‡]Issei Fujishiro, Yoshio Ohno, Department of Information and Computer Science, Keio University

完全に動作停止し、以降変化しない。処理は一切行わない。

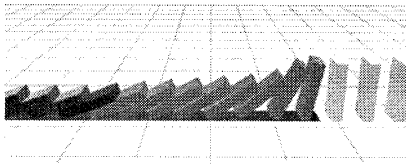


図 3: ドミノ牌の状態

各ドミノ牌には、その状態に応じて前進速度、回転速度、衝突判定間隔距離を割り当てる（表 1）。これらの数値は、現実の動きにより近くなるように状態ごとに比を設定しており、厳密な物理法則には従っていない。

表 1: 状態ごとの個別パラメータ設定

	前進速度	回転速度	衝突判定間隔
待機（白）	—	—	E
初動（赤）	V	T	E
併動（緑）	$V/4$	T	E
終動（青）	—	$T/10$	$E/10$
静止（黒）	—	—	—

3 実装

開発言語に Visual C++ を用いた。ユーザは、マウスとキーボードを用いて、シミュレーションの開始、一時停止、再現、視点の移動、ズーム、ドミノ牌配置変更等の指定が行える。

本シミュレーションでは、画面のちらつきを抑えるためにダブルバッファリングを用いて表示画面の切り替えを行った。また、ドミノ牌の設置数によって処理速度が大きく異なることから、リアルタイムでのシミュレーション表示のため、一定の処理時間を越えたフレームについては、コマンドライン上に警告表示を行っている。

表 2 にリアルタイム性を保持しながらシミュレーションを行える牌の最大の個数を実験環境ごとに示す。

表 2: 各種環境とリアルタイム性を保持できる個数

実行環境			個数
OS	Windows Vista		310
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo 1.40GHz		
メモリ	4.00GB		
GPU	Mobile Intel(R) 4 Series Express Chipset graphic chip 無し		
OS	Windows Vista		350
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Quad 3.00GHz		
メモリ	4.00GB		
GPU	NVIDIA GeForce 9800 GT 1,779MB		
OS	Windows Vista		380
CPU	Intel(R) Core(TM) i7 2.93GHz		
メモリ	12.0GB		
GPU	ATI Radeon HD 4800 Series 3,571MB		

美しく見えるよう作成したシミュレーションの表示結果例として、螺旋状配置（個数:65）、絵画出現配置（個数:1,185）を図 4 に示す。

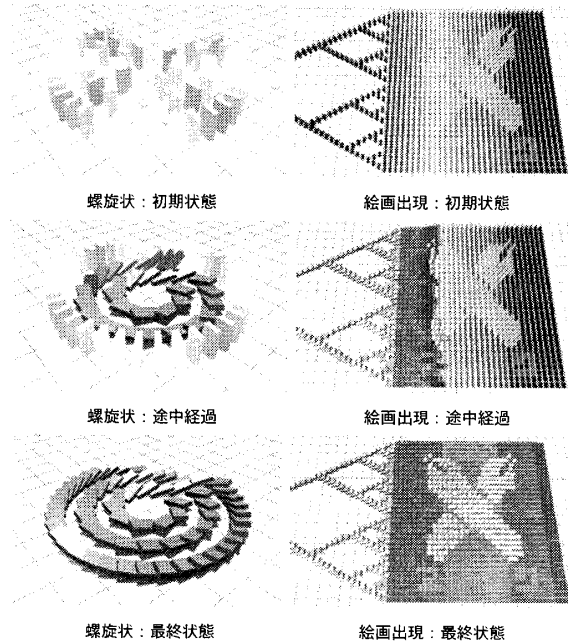


図 4: シミュレーション結果

4 まとめと今後の課題

本稿では、ドミノ倒しを対象を絞り、ビジュアルシミュレーションの処理軽減のための手法を提案した。

今後の課題を以下に列挙する。

- 物理法則の導入
目で見たもってもらいさだけでなく、見た目で判断できないような現実では再現が困難なシミュレーション内容の動作を保証するため、物理的厳密さを考慮に入れる。加速度、衝突判定、摩擦、空気抵抗などが挙げられる。
- 処理速度の向上
上記の物理法則の導入とのトレードオフであるが、より汎用的な処理軽減アルゴリズムへと改善する。
- インタフェースの改善
シミュレーション前段階での配置やレイアウト、カメラワークなどのインタフェース部分を拡張する。
- 評価の設定
厳密な現実の法則に従わないシミュレーションは評価が困難であるため、万人に自然だと感じられるための表現の改善や評価法の提案への取り組みを行う。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (B)20300033 の支援により実施された。

参考文献

- [1] David Baraff et al., *Physically Based Modeling: Principles and Practice*, SIGGRAPH '97 Course notes, No. 19, 1997.
- [2] Mark J. Harris et al., "Physically-Based Visual Simulation on Graphics Hardware," In Proc. *SIGGRAPH 2002*, pp. 109–118, 2002.