

人間の素朴な因果理解に準拠した汎用運動シミュレータ

A motion simulator compliant with human naïve understanding of causality

堀口 知也^{*1}
Tomoya Horiguchi

平嶋 宗^{*2}
Tsukasa Hirashima

溝口 理一郎^{*3}
Riichiro Mizoguchi

^{*1} 神戸大学
Kobe University

^{*2} 広島大学
Hiroshima University

^{*3} 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Most of current educational simulators reproduce mechanical phenomena with numerical calculation, so can't explain them based on causality. In qualitative reasoning technique so far, on the other hand, ad hoc heuristics are necessary for generating causal explanation. We proposed the *causality-compliant theory of force and motion* that is compliant with human naïve understanding of causality and can infer/explain mechanical phenomena with consistent principles. In this paper, the design of a general mechanics simulator based on the theory and its explanation generation feature are described.

1. はじめに

科学教育において、現象の観察や実験を補助するためのツールとしてしばしばシミュレータが用いられる。教育用シミュレータに求められる機能としては、(1)様々な状況下において生起する現象を可能な限り正確に再現できること、(2)それらの現象がなぜ・どのような機構で生起したかを説明できること、が挙げられる。機能(1)は、学習者が自ら様々な状況を設定し、生起する現象を観察する「実験を通じた学習」を支援するために必要である。一方、機能(2)は、学習者が現象を解釈して自身の仮説やモデルを修正・洗練し、領域への理解を深めていくために不可欠な支援を提供する。

従来の教育用シミュレータの殆どは、数学モデル(方程式)に基づいて上記の機能(1)を実現しており、その有用性は広く実証されてきている[Towne 2012]。しかし、それらは計算に用いた数学モデルがどのようにして得られたのかを説明する能力、すなわち機能(2)を持たない。そのため、現象の解釈・説明は主として人間(オーサや教師、学習者)に任されているが、それを領域の深い理解へ繋がるように行うことは容易ではない。

機能(2)を実現するためには、所与の状況に対するモデルをシミュレータ自身が導出する能力を持たねばならないが、それは高度に専門的な知識(例えば解析力学の手法)や、アドホックなヒューリスティクス(例えば学習参考書の「解法のテクニック」)によるものであってはならない。特に、科学的思考法の基礎を習得させることを目的とする初・中等教育においては、学習者の持つ素朴な概念に準拠した因果的な推論過程に沿って行われるものである必要があると筆者らは考える。ここでの難しさは、(a)直観的概念に基づく推論は科学的概念に基づくそれとしばしば整合せず、一貫した方法で正しいモデルを導出するのが困難である一方、(b)正しいモデルを導出する科学的方法はしばしば非直観的であることである。

筆者らは、初等力学において、人間の素朴な因果理解に準拠しつつ一貫した原理に基づいて正しいモデルを導出するための理論「力と運動に関する因果推論理論」(以下「素朴因果理論」と呼ぶ)[溝口 投稿中]を提唱してこの問題を克服し、上記の機能(1)(2)を併せ持つ汎用運動シミュレータを開発した。本稿では、同理論およびそれに基づく汎用シミュレータの設計原理と説明生成機能について述べる。

2. 素朴因果理論

本節では、素朴因果理論のうち、主に本研究で実装したシミュレータに関連する部分について述べる。

2.1 理論の概要

現象を因果的に理解しようとすることは合理的思考の基礎であり、すべての人が身につけるべき科学的素養である。しかし、素朴な因果的思考のみによっては、複雑な現象に対して十分な予測力・再現力を持つモデル(科学的モデルと呼ぶ)を得ることはできない。素朴な因果推論では、所与の原因に対して直ちにすべての結果が判明することを前提として、そのような原因-結果の組の直線的な連鎖を求めようと試みるが、系にフィードバックが含まれていれば直ちに行き詰まる。1970~80年代に行われた定性推論における因果解析も、このような因果伝播を基本としていたためフィードバックに対しては脆弱であり、不自然な仮定やアドホックなヒューリスティクスをしばしば必要とした[Weld 1990]。科学的モデルを得るためには、局所的な因果伝播のみでは不十分であり、大域的な情報が不可欠なのである。

筆者らは、因果には局所的なものと同域的なものがあるとの洞察に基づき、局所的な制約を満たしつつ推論を進め、大域的な情報の伝播が終わるのを待って因果が「完結する」とする因果理解の枠組みを提唱した。そして、それを初等力学に適用することによって、直観的な因果理解に準拠しつつ科学的なモデルを得ることができる推論方式を提供する「素朴因果理論」を提案した[溝口 投稿中]。その要点は、ニュートンの第三法則(作用反作用の法則)に因果の概念を導入したこと、および作用・反作用が実在する根拠を示すために同第二法則(運動の法則)に新しい解釈を与えたことである。その詳細を次節で述べる。

2.2 素朴因果理論の原理

本理論において再解釈されたニュートンの第三法則は次の通りである。

ある力が作用として加えられると、向きが反対で大きさが等しい力が反作用として返される。二つの力が同時に生起したとしても、作用=原因・反作用=結果の因果を同定できるものとする。ただし、本法則が主張するのは「向きが反対で大きさが等しい」こと(恒等性)のみであり、これを因果性1(局所的な因果性)と呼ぶ。大きさ(値)の決定には大域的な情報が

必要であり、それは後述の原理(再解釈された同第二法則)に基づいて行われる。

例えば、床上の静止物体を手で押そうとすると、手が発揮した力(作用)と同じ大きさの力(反作用)が物体から返されることは、第三法則から直ちに判明する。しかし、それらがどのような大きさであるかは、物体の挙動(動く・動かない)が判明するまで決定することはできない。物体が動かないときは手が発揮しようとした力 F と同じ大きさとなるが、物体が動くときはそれよりも小さな力となる(結果として、手は F よりも小さな力しか発揮できない)。そして、その決定には手と物体だけでなく、物体を取り巻く状況(例えば、床との摩擦力や、背後に他の物体がある・ないなど)への大域的な参照が必要となる。

通常、このような場合には因果推論を諦め、局所的な恒等性に基づいて方程式を立式し、それを解くことで値の決定が行われる。(定性推論における因果解析では、領域依存(主として電子回路)のヒューリスティクスを用いて大域的情報に関する自然な仮定を試みるが、その当否は対象系に依存する。また、力学に関する適切なヒューリスティクスは知られていない。)これに対して、本理論では、作用を受けた物体がどのような大きさ(値)の反作用を返すかは、大域的な情報が伝播し終わって初めて決まるとした上で、そのような力の値とその根拠を求めるための系統的な手順を定式化した。その中心となるのは、ニュートンの第二法則の次のような再解釈である。

ある力 F を質量 m の物体に作用させて加速度 a が生じたとき、物体は反作用 $-ma$ を返し、両者は力を加えた主体と物体との境界面においてつり合う($F = ma$)。

通常、第二法則における項 ma は力と見なされないが、本理論ではこれを実在の力と認め、物体が動きながら作用に対して返す反作用であるとする。一方、物体が動かないときは、作用よりも大きな閾値を持つ静止摩擦力によるか、絶対に動かないと仮定しているもの(壁など)からの支えによって反作用を返すものとする。いずれの場合も、物体の挙動(動く・動かない)が判明するまで周囲への大域的な参照を行い、その後、作用・反作用の値が決定されることになる。これを因果性2(大域的な因果性)と呼ぶ。このようにして、物体が動く場合も動かない場合と同様に、反作用が返る明確な根拠を示すことができる。

例1 図1において、物体に外力 F を作用させたとき、物体は床との摩擦力を持たないので壁を F で押そうと試みる。壁は動かないと仮定されるので、これに対して反作用 $-F$ を返すことができる。このとき物体は動かないこと、 F で壁を押せていたことが判明するとともに、物体は壁から受けた $-F$ を根拠として、外力 F に対して反作用 $-F$ を返すことがわかり、これをもって因果が完結する。

例2 図2において、物体に外力 F を作用させたとき、物体と床との間に摩擦があれば、物体は床を F で押そうと試みる。最大静止摩擦力が十分大きければ、床は反作用 $-F$ を返すことができる。このとき物体は動かずに F で床を押せていたことが判明し、物体は床から受けた $-F$ を根拠として、外力 F に対して反作用 $-F$ を返す。一方、最大静止摩擦力の大きさが不十分であれば、床は $-F$ を返すことができないので、物体は右へ動いて $-ma$ を生じるとともに、床を μmg で押して反作用 $-\mu mg$ を受けていたことが判明する。物体はこれらの力を根拠として、外力 F に対して反作用 $-F = -ma - \mu mg$ を返すことがわかる。

例3 図3において、物体1に外力 F を作用させたとき、物体1は床との摩擦力を持たないので物体2を F で押そうと試みる。物体2も床との摩擦力を持たず、かつ右側には何もないので、右へ動いて反作用 $-m_2a$ を返す(物体2の挙動の判明)。つまり、物体1は物体2を実際には m_2a で押ししていたことがわかる。このとき、物体1も同じ加速度で動くことになるので(物体1の挙動の判明) $-m_1a$ を生じ、結局、物体1は外力 F に対して自ら生じた $-m_1a$ と物体2から受けた $-m_2a$ を返すことになる($F = m_1a + m_2a$)。

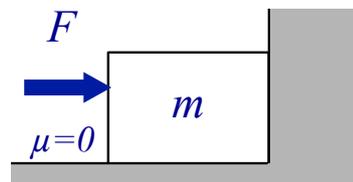


図1 床上の物体(1)

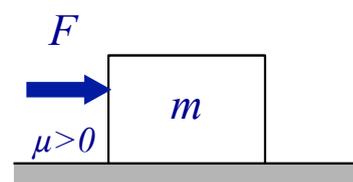


図2 床上の物体(2)

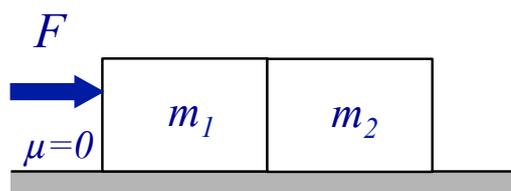


図3 床上の2物体

これらの例において、起点となる力が局所的な因果性(因果性1)に従いつつ系内を伝播されていき、大域的な因果性(因果性2)によって必要な情報を補完された科学的モデルが得られて完結する因果推論が実現されていることがわかる。なお、上に述べたのは素朴因果理論のうち、接触力における作用反作用、および接触力としての慣性力に関する部分である。同理論にはもう一つ、遠隔力としての慣性力(遠心力・向心力)の実在論という重要な部分があるが、本稿では省略する。

2.3 教育的意義

学習者にとって身近な力学現象とは、観察できる物体の「運動」と、感じることのできる「力」であり、これらを正しく説明する能力を与えることが、教科としての力学の意義である。従来の力学教育では、これらのうち「運動」を説明することに注力しており、第二法則中心の力学であったといえる。第二法則において現れる力は運動のために要請される力であり、人が感じる力に関するものではなかった。第三法則である作用反作用の法則が人の感じる力を直接取り扱うものであるが、それは運動を説明する力を見つけるためのヒューリスティクスとして専ら用いられ、人の感じる力を説明するために正しく使われていなかった。このことは学習者に力学を学ぶ意義を疑わせることになり、誤概念の発生を容易にし、その修正を困難にしているといえる。上述の通り、素朴因果理論は第三法則と第二法則の再解釈を基礎として、学習者が経験的に知っている「感じることのできる力」を実在の力として因果的に説明する術を与えるものとなる。これが本理論

の教育的意義であり、これまでの力学教育を大きく改善する可能性を持っている。

従来の第三法則の教え方の問題点として、(1)反作用が何を根拠にして発生するか、および(2)同じ力が反対方向に働くにも関わらず物体が動く場合があること、が適切に説明されていないことがあげられる。素朴因果理論を用いれば、これらを一貫した原理に基づいて適切に説明することができる。例えば上の例3において、従来の力学教育を受けた学習者が持つ典型的な誤概念は「物体1が押す力の方が物体2が押し返す力より大きい」というものである[Hestenes 1992]。つまり、物体が動くことと、作用反作用が釣り合うことを整合的に理解することができていない。同例で示した因果的説明は両者を違和感なく統合しているため、このような誤概念の発生を抑えることができると考えられる。

これらのことから、素朴因果理論に基づいて提案される教育の方法論は、(a)人が感じる力を取り上げ、(b)その力がどのように因果的に伝播した結果、作用反作用として釣り合ったのかを説明する因果推論の方法を教えることを基本方針とする。そして、同理論に基づいて力学現象を予測・説明することができるシミュレータの実現は、このような力学教育を広く実践することに貢献すると期待される。

3. 汎用運動シミュレータ

3.1 設計原理

筆者らはこれまでに、素朴因果理論のサブセットである接触力における作用反作用、および接触力としての慣性力に関する因果推論を行う能力を持つシミュレータ Karma¹を実装した。Karma は、同理論の原理(公理)および実装上の制約により、次の範囲を取り扱う。

- 定性的な推論を原則とし、情報が不足するときはすべての場合を推論する
- 物体の複雑な形状は扱わず、すべて単純な矩形とする
- 直交座標に沿った二次元の運動を扱う
- 物体はすべて完全剛体とし、受けた力を瞬時に伝達する(透過伝達性)
- 物体は力を受けて破壊されることはない
- 動くことのできる物体(可動体)と、絶対に動かない物体(不動体。床、壁、地球など)とがある
- 力は足し合わせることができる(加算性)
- 自分で力を発揮できる物体(可動体)があり、エージェントと呼ぶ
- 因果の起点は、物体に加えられた外力またはエージェントが発揮した力とする。そのような力が系内に複数あるときは、それぞれを起点とした因果推論を行う(複数視点)
- 推論の範囲は、起点となる力が作用した瞬間、それが系内にどのように伝播して作用反作用が釣り合い、各物体にどのような加速度(静止を含む)を生じるかが決定するまでとする

現在は完全剛体のみを対象としているが、以下に示す方針で糸、滑車、バネ(弾性体)を扱うことは容易であり、実装の準備を進めている。この拡張により、初等力学における物体の相互作用に関する殆どの例題(衝突を除く)を扱えるものと見込んでいる。

- 糸:緊張状態にあるときのみ引く力の伝達器として機能する(質量は持たない)
- 滑車:糸と組み合わせることで力の方向変換器として機能する(質量を持つ場合と持たない場合がある)
- バネ(弾性体):自然長からの伸縮距離に比例した力を発揮する(弾性限度内のみ。質量を持つ場合と持たない場合がある)

また、力の合成・分解の機能を実現することにより、斜面を含む問題や円運動(接線・法線方向の力)に関する問題を扱えるようになる。特に後者については、素朴因果理論の今一つの重要な部分である遠隔力としての慣性力(遠心力・向心力)に関する議論を可能にするため、優先的に実装の準備を進めている。シミュレータの因果推論および説明生成の手順を以下に示す。

- (1) 一つの物体に働く外力を因果の起点とする。(押される場合と引かれる場合は同形であるため、以下押される場合のみ記述する)
 - (2) その物体が不動体である場合、押された力と同じ大きさで向きが反対の力を反作用として返す。
 - (3) その物体が可動体であり、かつ十分な静止摩擦力があれば、押された力と同じ大きさで向きが反対の力を反作用として返す。そうでなければ、次の二つの場合のいずれかを行う。
 - (4-1) その物体が押された方向に他の物体と隣接していなければ、その方向に動いて押された力と同じ大きさで向きが反対の力 $-ma-fr_k$ を反作用として返す。ここで、 m 、 a は物体の質量、加速度、 fr_k は動摩擦力(≥ 0)である。
 - (4-2) その物体(物体1とする)が押された方向に他の物体(物体2とする)と隣接していれば、物体2を押す。物体2について(2)~(4-1)を再帰的にを行い、動くかどうかを決定する。このとき、因果性2および加算性により「押された力 $=ma+fr_k$ +物体2からの反作用」(動く場合)または「押された力 $=fr_s$ +物体2からの反作用」(動かない場合。 fr_s は静止摩擦力(≥ 0))であり、いずれも右辺が物体1が押された力に返す反作用である。
- * エージェントがある方向に力を発揮しようとしている場合は、その力をエージェントに働く外力(因果の起点)として上記の処理を行う。動かない場合は意図した力をすべて発揮できており、動く場合は意図した力から自身が動くことによる慣性力 ma を差し引いた力を発揮できたことになる。また、エージェントが力を発揮した根拠を説明するため、意図した力と同じ大きさで向きが反対の力をエージェントの足下の床、および必要であれば背後の物体に外力として加えたときの因果伝播をも上記に従って導出する。床および背後の物体(必要でありかつ存在すれば)から返された反作用(動く場合はそれに自身の慣性力を加えた力)が、意図した力を発揮できた根拠となる。

3.2 説明生成例

説明生成例1 例3(図3)の例題に対する説明生成例を図4に示す。重力を仮定しているため、物体1にかかる重力、物体2にかかる重力および外力を起点とする三つの因果連鎖(causal-chain)が同定されている(連鎖2は省略)。連鎖1の説明は次の通りである。物体1(B1)に重力(G1)が下向きにかかるが、物体1は摩擦力などによってそれに反作用を返すことができないため、隣接する床(F1)をG1で押そうとする。床は不動体である

¹ 仏教語で因果、因縁の意。

ので反作用-G1を返すことができ、物体1は動かないこと、および床をG1で押せていたことが判明する。そして、物体1は床から受けた反作用を根拠として外力に反作用-G1を返し、因果が完結する。また、連鎖3の説明は次の通りである。物体1(B1)に外力(EXF1)が右向きにかかるが、物体1は摩擦力などによってそれに反作用を返すことができないため、隣接する物体2(B2)をEXF1で押そうとする。物体2も摩擦力などによって反作用を返すことができず、かつ右側に隣接する物体がないので、右へ動いて反作用-M2Aを返す。ここで、物体1は-M2Aで物体2を押せていたこと、および右へ動いて-M1Aを生じることが判明する。そして、物体1は自ら生じた-M1Aと物体2から受けた-M2Aを外力に対して返し($EXF1 = M1A + M2A$)、因果が完結する。

```
=>causal-chain(1):
=>pretty explanation:
APPLIED-FORCE G1 pushes BLOCK B1 in DW direction.
BLOCK B1 is pushed by APPLIED-FORCE G1 in DW
direction.
BLOCK B1 cannot repel by itself because it has
neither counter external force nor friction, so
asks help of its neighbor in DW direction.
FLOOR F1 is pushed by BLOCK B1 in DW direction.
FLOOR F1 secceds to repel by itself because it is
immobile.
BLOCK B1 is repelled by FLOOR F1 in UW direction, so
it doesn't move.
APPLIED-FORCE G1 is repelled by BLOCK B1 in UW
direction.
```

```
=>causal-chain(3):
=>pretty explanation:
APPLIED-FORCE EXF1 pushes BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B1 is pushed by APPLIED-FORCE EXF1 in RW
direction.
BLOCK B1 cannot repel by itself because it has
neither counter external force nor friction, so
asks help of its neighbor in RW direction.
BLOCK B2 is pushed by BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B2 cannot repel by itself because it has
neither counter external force nor friction, so
moves in RW direction to generate reaction.
BLOCK B1 is under-repelled by BLOCK B2 in RW
direction, so it moves in RW direction.
APPLIED-FORCE EXF1 is under-repelled by BLOCK B1 in
RW direction.
```

図4 床上の2物体に関する因果的説明(1)

```
solution(1):
=>causal-chain(2):
=>pretty explanation:
APPLIED-FORCE EXF1 pushes BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B1 is pushed by APPLIED-FORCE EXF1 in RW
direction.
BLOCK B1 cannot repel by itself because it has
neither counter external force nor friction, so
asks help of its neighbor in RW direction.
BLOCK B2 is pushed by BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B2 secceds to repel by itself with friction
FR1 with FLOOR F1, so it doesn't move.
BLOCK B1 is repelled by BLOCK B2 in LW direction, so
it doesn't move.
APPLIED-FORCE EXF1 is repelled by BLOCK B1 in LW
direction.
```

```
solution(2):
=>causal-chain(2):
=>pretty explanation:
APPLIED-FORCE EXF1 pushes BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B1 is pushed by APPLIED-FORCE EXF1 in RW
direction.
BLOCK B1 cannot repel by itself because it has
neither counter external force nor friction, so
asks help of its neighbor in RW direction.
BLOCK B2 is pushed by BLOCK B1 in RW direction.
BLOCK B2 fails to repel by itself with friction
FR2 with FLOOR F1, so moves in RW direction to
generate reaction.
BLOCK B1 is under-repelled by BLOCK B2 in RW
direction, so it moves in RW direction.
APPLIED-FORCE EXF1 is under-repelled by BLOCK B1 in
RW direction.
```

図5 床上の2物体に関する因果的説明(2)

説明生成例2 例3(図3)の例題において、物体2と床との間に摩擦力が働く場合の説明生成例を図5に示す。このとき、最

大静止摩擦力の大きさによって物体が動く場合と動かない場合とが生じるので、二つの解(solution)が生成されている。それぞれの解において、物体1にかかる重力、物体2にかかる重力および外力を起点とする三つの因果連鎖(causal-chain)が同定される(重力を起点とする連鎖は省略)。解1は動かない場合であり、説明は次の通りである。物体1(B1)に外力(EXF1)が右向きにかかるが、物体1は摩擦力などによってそれに反作用を返すことができないため、隣接する物体2(B1)をEXF1で押そうとする。物体2は静止摩擦力によって(動かずに)反作用-EXF1を返すことができ、物体1も動かないこと、および物体2をEXF1で押せていたことが判明する。そして、物体1は物体2から受けた反作用を根拠として外力に反作用-EXF1を返し、因果が完結する。解2は動く場合であり、物体2が返す反作用に-MUM2G2(物体2に働く動摩擦力)が加わることを除いて、上の例と同様である。

4. おわりに

人間の素朴な因果理解に準拠しつつ一貫した原理に基づいて現象を推論・説明することのできる素朴因果理論、および同理論に基づく汎用運動シミュレータの設計原理と説明生成機能について述べた。本稿で論じたように、素朴因果理論は従来の力学教育を大きく改善する可能性を持ち、学習者の動機づけを高め、誤概念の発生を抑える効果が期待される。現在、本理論に基づく教育方法論の整備と予備的検証、シミュレータの洗練作業を進めており、シミュレータと連携した教育実践を進めていく予定である。

参考文献

- [Hestenes 1992] Hestenes, D., Wells, M., Swackhamer, G.: Force Concept Inventory, The Physics Teacher, Vol.30, March, pp.141-158, 1992.
- [溝口 投稿中] 溝口, 平嶋, 堀口: 力と運動に関する因果推論理論, 人工知能学会論文誌 (投稿中).
- [Towne 2012] Towne, D.M., de Jong, T. and Spada, H. (Eds.): Simulation-Based Experiential Learning, Springer-Verlag, 2012.
- [Weld 1990] Weld, D.S. and de Kleer, J. (Eds.): Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann, 1990.