

令和4年度 学士論文

物理系を定義できるシミュレータ
SimSymの提案

東京工業大学 情報理工学院 数理・計算科学系
学籍番号 18B04657

木内 康介

指導教員

増原 英彦 教授

令和5年2月6日

概要

ここに Abstract を書く

謝辞

本研究を進めるにあたり、増原英彦教授、叢悠悠助教を始めとした増原研究室の皆様
多くのアドバイスやご指導をいただきました。また、lively.next 開発者の Robin, Linus,
Jens にも助けていただきました。本論文は以上の方々のご支援がなければ存在しえ
ませんでした。この場を借りて感謝申し上げます。

目次

第1章 はじめに	1
第2章 関連研究	3
2.1 PhET	3
2.1.1 PhET を用いた実例	3
2.2 Scratch	4
第3章 SimSym の構成	5
第4章 実装の方針	8
第5章 まとめと課題	9
付録A 補足	11
A.1 モンキーハンティング	11

第1章 はじめに

高等学校における物理学の授業において、実験は重要である。Holubova [1] は、実験室での作業は理論的な概念を検証する最も重要な方法であり、生徒は実験を通してどのような現象が起きるかを確認することができると述べている。

しかし実際は、生徒全員が実験を経験しているわけではない。林らは、2014年に大学生を対象に物理実験の経験を調査した [2]。これによると、力学分野において最も基本的な「運動の法則」に関する実験経験は60%であった。また、斜方投射の基本的な問題である「モンキーハンティング (A.1)」に関する実験は10%に満たない。この理由としては、実験用の装置の準備や測定が難しいことや、実験を行うのに時間を要することが考えられる。

そこで実験の代替として近年利用されているのが、物理実験のシミュレータである。シミュレータを用いることで、実験と同様の学習効果を得ることができる。Ajredini [3] は、既存の物理実験シミュレータである PhET [4] を用いる授業と実際に実験を行う授業を実施し、テストを行った。その結果、シミュレーションによって得られる知識と実際の実験によって得られる知識の間には有意な差はないと結論づけた。

しかし、既存のシミュレータでは不十分な点が存在する。学習者が理論を学習するとき、物理法則やそれを前提とした運動を方程式を通して学習する。図 1.1 は実際に生徒が解く問題の例である。学習者は教科書等で学習した物理法則を方程式の形で利用し、結果も方程式の形で表現される。一方既存のシミュレータである PhET では、図 1.2 のように速度や質量、位置のような物理量を数値でしか確認できず、描画されている物理系がどのような方程式によって表現されているのかわからない。

そこで本研究では、物理系を定義できるシミュレータである SimSym (Simulation with Symbols) を提案する。学習者は SimSym で系内の物体をそのパラメータとともに定義し、その物体の運動を表す方程式を立式する。この際学習者は、次元の異なる物理量の和などの不正な方程式は警告されるなど、正しい物理系を作成するための補助を受ける。シミュレーションを実行すると、定義した物理系に基づいて数値計算がなされ、物体の運動が可視化される。また、SimSym には現実の運動を正しく表現した動作例が存在し、学習者は参考にすることができる。

SimSym の利点は、現実の運動を確認できるだけでなく、学習者が定義した方程式と間の対応を理解できるという点である。既存のシミュレータはツール側が物理系を全て提

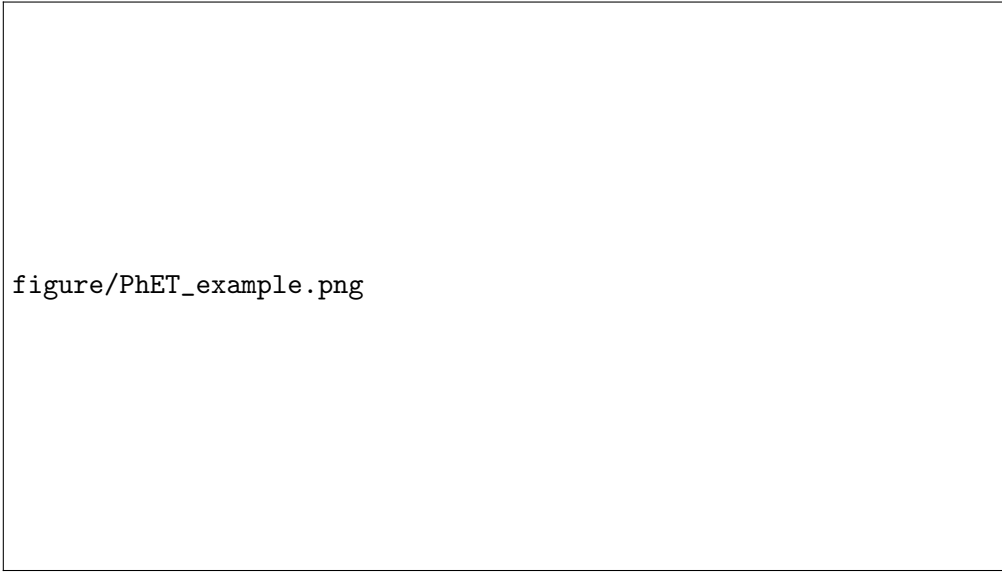
(問題) 静止している質量 m の物体に大きさ F の力をかけ続ける。 t 秒後の速さを求めよ。

(解答) 物体の加速度を a とする。運動方程式より $ma = F \therefore a = \frac{F}{m}$ 。等加速度運動の公式

より $v = at = \frac{F}{m}t$

答え: $\frac{F}{m}t$

図 1.1: 方程式の計算例



figure/PhET_example.png

図 1.2: PhET のシミュレーション例

供し、学習者はパラメータを指定するだけである。一方 SimSym では、学習者は動作例と比較しながら物理系を定義することで、現実の運動がどのような方程式で表されるものなのか理解できる。

なお、SimSym は実際にシミュレーションを表示する部分以外は未実装であるが、3 章で説明するアイデアは 4 章に記す方針で実装が可能であると考えている。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章で、既存のシミュレータとそれを用いた実例について紹介する。第 3 章で、SimSym のアイデアを説明する。第 4 章で、SimSym の実装について説明する。第 5 章で、まとめと今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

この章では、既存のシミュレータとそれを用いた教育の実例について紹介する。

2.1 PhET

PhET(Physics Education Technology) [4] は、コロラド大学ボルダー校によるプロジェクトで、物理学の教育に活用できるシミュレーションの作成を目標としている。2023年1月現在、ウェブサイト¹上では50以上のシミュレーションが公開されている。また、物理学のみならず化学・数学・生物学・地球科学などのシミュレーションも公開されている。

2.1.1 PhET を用いた実例

Prima [5] は、インドネシアの中学校の生徒に PhET を用いて太陽系について教える実験を行った。Prima は、PhET を利用する効果を N-Gain(normalized gain) を用いて評価している。満点を 100 とする pre-test と post-test の平均点をそれぞれ $\langle \text{pre-test} \rangle$, $\langle \text{post-test} \rangle$ とすると、N-Gain $\langle g \rangle$ は以下のように求められる:

$$\langle g \rangle = \frac{\langle \text{post-test} \rangle - \langle \text{pre-test} \rangle}{100 - \langle \text{pre-test} \rangle}$$

また、テストは Bloom's Taxonomy に基づき Remembering, Understanding, Applying, Analyzing の 4 領域で行われた。結果は表 2.1 の通りである。

Cognitive level	Control Group			Experiment Group		
	pretest	posttest	N-Gain	pretest	posttest	N-Gain
Remembering (C1)	33.33	76.19	0.64	44.44	84.12	0.71
Understanding (C2)	38.62	57.67	0.31	51.85	75.66	0.49
Applying (C3)	54.76	80.95	0.57	69.04	92.85	0.76
Analyzing (C4)	56.34	75.39	0.43	57.14	80.15	0.53

表 2.1: Prima による実験の結果

この調子で書いていくと [5] の内容を翻訳するだけになるので一旦中断
[6]

¹<https://phet.colorado.edu>

2.2 Scratch

Scratch² について

Scratch を用いた実例の紹介 [7]

²<https://scratch.mit.edu>

第3章 SimSymの構成

SimSymの画面は、図 3.1 のように左半分の物理系定義ペインと右半分の観測ペインに分かれている。

物理系定義ペイン

学習者は、物理系定義ペインで以下の操作を行うことで、物理系を定義することができる。

1. **物体の作成:** 学習者が物体名を入力すると、SimSymはその物体に紐付いた物理量に対応する次元付き変数 ($m_A[\text{M}]$, $x_A[\text{L}]$ など¹) を生成する。
2. **方程式の立式:** 学習者は、1. で生成された変数を使って方程式を立式する。この際、次元付き変数は自由に追加することができる。なお、時刻を表す変数 $t[\text{T}]$ や重力加速度 $g[\text{L}/\text{T}^2]$ などの物理定数は物体に紐付かない変数として用意されている。また、不正な次元の方程式は警告される。

観測ペイン

物理系の定義後、以下の操作を行うことで観測ペインに情報が描画される。

3. **観測対象の指定:** 学習者は観測したい物体とその物理量 (位置・速度・加速度) を指定する。
4. **初期値の入力:** 観測対象を指定した際に、その値を計算するために必要な変数が観測ペイン下部に表示される。これらに値を入力する。
5. **シミュレーションの再生:** シミュレーションを再生すると、時刻 t が変化しながら観測対象の物理量が描画される。物体の位置は座標平面上の位置として、速度と加速度はベクトルとして描画される。
6. **動作例の選択 (オプション):** 学習者は現実の運動を正しく表現した動作例を選択することができる。動作例と学習者が定義した物理系の運動を比較することで、現実と同じ運動を表現しているか確認することができる。

以下では具体例を見ていく。図 3.1 は、SimSym 上で x 軸方向の初速が v_{0x} , y 軸方向の初速が v_{0y} , 重力加速度の大きさが g であるような斜方投射を表現した例である。

¹M: Mass(質量), L: Length(長さ), T: Time(長さ)などを次元と呼ぶ。例えば速度の次元は $[\text{L}/\text{T}]$ と表される。

1. 物体 A を作成すると、 x_A , y_A , v_{Ax} , v_{Ay} が生成される。初速に対応する変数 v_{0x} , v_{0y} を物体 A に追加する。
2. 1. で用意した変数を用いて方程式を立式する。
3. 観測対象の物体として A を選択し、位置と速度を選ぶ。
4. v_{Ax} , v_{Ay} , x_A , y_A を計算するのに必要な g , v_{0x} , v_{0y} に値を入力する。
5. シミュレーションを再生すると、位置と速度が描画される。
6. 動作例として斜方投射を選択し、観測ペーンに破線で表示された正しい軌道と比較する。

ここで、方程式の立式の際に $v_{0x} + t$ ([L/T] + [T]) のように次元の一致していない式を定義しようとする、図 3.2 のように警告される。また、重力加速度の向きを間違え $v_{Ay} = v_{0y} + gt$, $y_A = v_{0y}t + \frac{gt^2}{2}$ のように定義すると、図 3.3 の実線のような軌道を描いて運動するが、これは動作例の破線と大幅に異なる。そのため、これは現実の運動を正しく表せていないことがわかる。

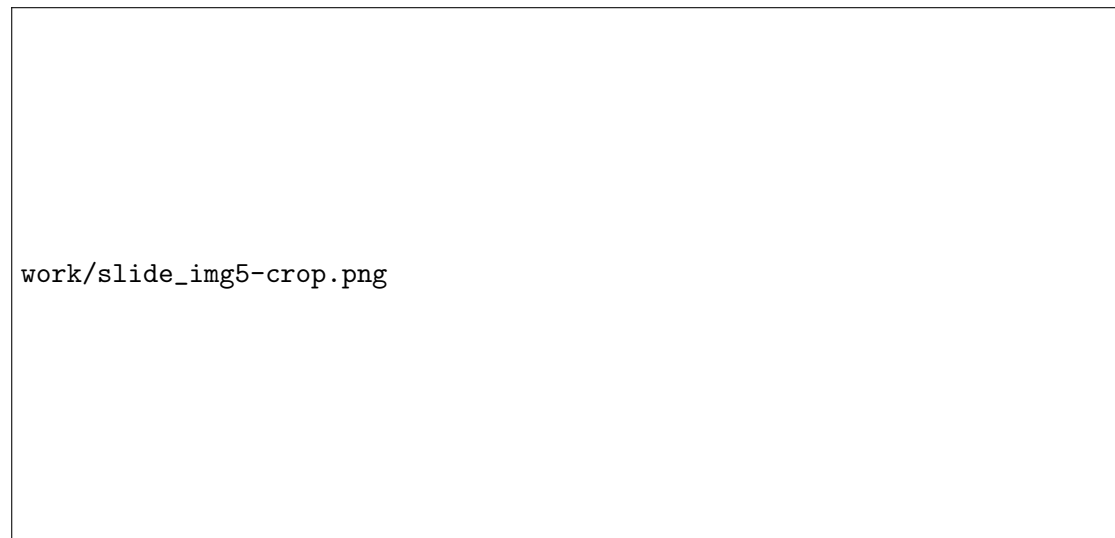


図 3.1: SimSym 上で斜方投射を表現した例

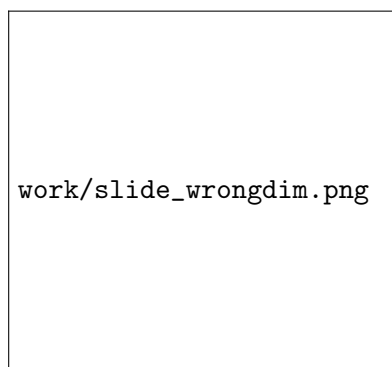


図 3.2: 誤った次元の定義例



図 3.3: 誤った運動の定義例

第4章 実装の方針

フロントエンドに lively.next [8] を、方程式の処理と数値計算に SymPy [9] を使い、JavaScript で実装する。lively.next は、GUI アプリケーションを作成・実行するための Web プログラミング環境である。学習者が物体や方程式を定義する画面とシミュレーションを表示する画面を lively.next で作成する。SymPy は、記号計算のための Python ライブラリであり、Pyodide¹ を用いることで WebAssembly に変換し、ブラウザで実行する。SimSym は、入力された物理量や方程式を SymPy オブジェクトに変換することで、数値計算を可能にする。シミュレーションの実行時は、設定された時刻 t の範囲を粒度 Δt ずつ変化させる。各方程式に各 t を代入した結果を lively.next が受け取り、描画する。シミュレーションのリアルタイム性を確保するため、各 t を方程式に代入した値は方程式の定義時・変数の値の変更時にあらかじめ計算する。

¹<https://github.com/pyodide/pyodide>

第5章 まとめと課題

本研究では、物理系を定義できるシミュレータ SimSym を提案した。学習者は SimSym を用いることで、自身が定義した物理系の運動と現実の運動との対応を視覚的に確認することができる。

今後は、まず実装を進めることが課題である。実装が完成したら、SimSym の教育効果を評価する必要がある。評価手法として、Hake [10] が導入した normalized gain を用いた実験を検討する。

参考文献

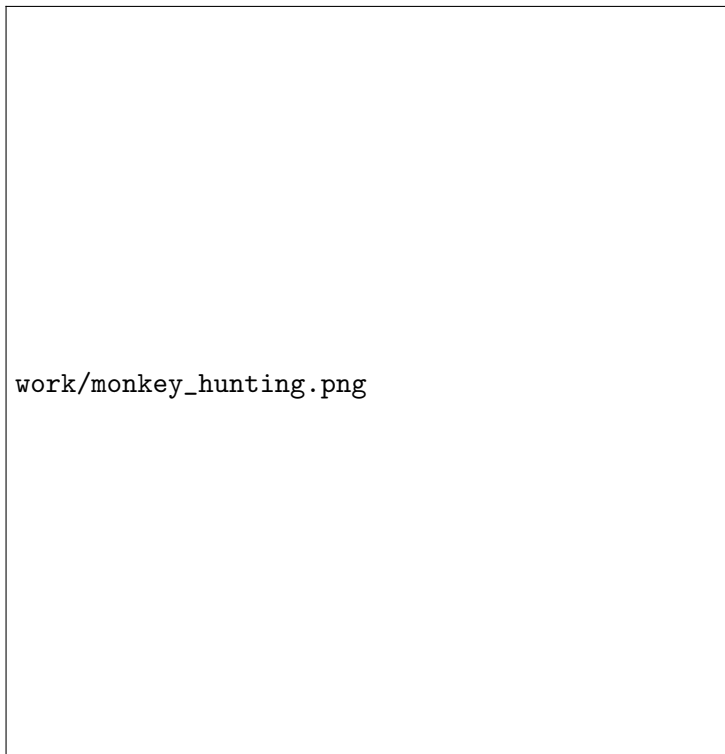
- [1] Renata Holubova. The impact of experiments in physics lessons – “why, when, how often?” . *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2152, No. 1, p. 030007, 2019.
- [2] 林 壮一ほか. 大学生に対する高校物理実験および放射線学習の現状調査. 物理教育, Vol. 63, No. 3, pp. 191–196, 2015.
- [3] Fadil Ajredini, et al. Real Experiments versus Phet Simulations for Better High-School Students ’ Understanding of Electrostatic Charging. *European Journal Of Physics Education*, Vol. 5, No. 1, p. 59, February 2014.
- [4] Katherine K. Perkins, et al. PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics. *The Physics Teacher*, Vol. 44, No. 1, pp. 18–23, January 2006.
- [5] Eka Cahya Prima, Aldia Ridwani Putri, and Nuryani Rustaman. Learning solar system using PhET simulation to improve students ’ understanding and motivation. *Journal of Science Learning*, Vol. 1, No. 2, p. 60, March 2018.
- [6] Nadia Rehman, Wanlan Zhang, Amir Mahmood, and Faiz Alam. Teaching physics with interactive computer simulation at secondary level. *Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade*, Vol. 14, No. 1, p. 127, March 2021.
- [7] Víctor López and María Isabel Hernández. Scratch as a computational modelling tool for teaching physics. *Physics Education*, Vol. 50, pp. 310 – 316, 2015.
- [8] Daniel Ingalls, et al. The lively kernel a self-supporting system on a web page. In Robert Hirschfeld and Kim Rose, editors, *Self-Sustaining Systems*, pp. 31–50, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [9] Aaron Meurer, et al. SymPy: symbolic computing in Python. *PeerJ Computer Science*, Vol. 3, p. e103, January 2017. Publisher: PeerJ Inc.
- [10] Richard Hake. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, Vol. 66, , 01 1998.

付 録 A 補足

A.1 モンキーハンティング

以下のような形式の問題を総称してモンキーハンティングと呼ぶ。

小球を、位置 $(0, 0)$ から初速 v_0 、仰角 θ で発射したところ、位置 (l, h) から自由落下してくる物体に衝突した。 $\tan \theta$ の満たすべき条件を求めよ。ただし、重力加速度の大きさを g とする。



work/monkey_hunting.png