

公立はこだて未来大学 2024 年度 システム情報科学実習 グループ報告書

Future University Hakodate 2024 Systems Information Science Practice
Group Report

プロジェクト名

Dynamics Insights: Unveiling Complex Patterns

Project Name

Dynamics Insights: Unveiling Complex Patterns

グループ名

馬班

Group Name

Hose Group

プロジェクト番号/Project No.

19-A

プロジェクトリーダー/Project Leader

樋田悠馬 Yuma Hida

グループリーダー/Group Leader

昆陽馨 Kaoru Konyo

グループメンバ/Group Member

昆陽馨 Konyo Kaoru

樋田悠馬 Yuma Hida

鈴木流人 Ryuto Suzuki

指導教員

加藤譲 Kato Yuzuru 義永那津人 Yoshinaga Natsuhiko 栗川知己 Kurikawa Tomoki

Advisor

Riabov Volodymyr, Damian Rivers

提出日

2025 年 1 月 21 日

Date of Submission

January 21, 2025

概要

本プロジェクトでは日常に見られるダイナミクスの複雑なパターンを数理モデルやデータ解析を用いて解明すること、またその解明の過程で数学やデータ解析のスキルを手に入れることを目的としている。数理モデルを用いると、自然現象や社会課題などの複雑な現象を数式を用いて単純化（モデル化）することができる。そのため数理モデルはその数式を用いて、結果の予測や分析に優れている。例を挙げると、人の歩行モデルを作成することで、ロボットの二足歩行開発に貢献していたり、鳥の群れの再現をすることにより、映画のCGに利用されていたりする。その中でも私たちは四脚歩行モデルに注目した。なぜなら、四脚歩行のモデルではロボットなどの利用はされているがシミュレーション方面ではあまり研究されていないからだ。よって、私たちのグループでは動物の動きを数理モデル化し、そのシミュレーションを行う。

キーワード ダイナミクス, 数理モデル, データ解析, シミュレーション,

(※文責: 昆陽馨)

Abstract

The aim of this project is to use mathematical modeling and data analysis to unravel the complex patterns of dynamics found in everyday life, while also acquiring mathematical and data analysis skills in the process. Mathematical modeling allows complex phenomena, such as natural phenomena and social issues, to be simplified (modeled) using mathematical formulae. As a result, mathematical models are excellent at predicting and analyzing outcomes. Examples include the creation of human gait models, which have contributed to the development of bipedal walking in robots, and the reproduction of bird flocks, which are used in film computer graphics. Among these, we focused on quadrupedal walking models. This is because, although quadrupedal walking models have been used in robotics, they have not been extensively studied in the field of simulation. Therefore, our group is developing a mathematical model of animal locomotion and conducting simulations.

Keyword Dynamics, mathematical model, data analysis, simulation

(※文責: 昆陽馨)

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	前年度の成果	1
1.2	先行研究	1
1.3	本研究の重要性	1
第 2 章	関連研究	2
2.1	使用したプログラム	2
2.2	数理モデル	2
2.3	数値的な微分方程式の解法	2
2.3.1	オイラー法	2
2.3.2	ルンゲクッタ法	2
2.4	高速フーリエ変換 (FFT)	3
第 3 章	プロジェクト学習の目標	4
第 4 章	目的を達成する手法, 手段	5
4.1	データの取得	5
4.2	二重振り子のシミュレーション	5
4.3	二重振り子から馬の脚の動きのモデルの作成	6
4.4	実際の馬の脚の動きとモデルの比較	7
4.5	画像との連動によって, より最もらしいアニメーションへ	7
第 5 章	結果	8
5.1	実データの取得	8
5.2	前脚モデルの作成	8
5.3	実際の馬の脚の動きとモデルの比較	9
5.4	画像との連動によって, より最もらしいアニメーションへ	9
第 6 章	考察	10
6.1	比較結果について	10
6.2	数理モデルの付加項について	10
6.3	画像を組み合わせたことの効果	10
6.4	今後の展望	10
6.5	大学との関連	11
6.6	今後のプロジェクトの拡張について	11
	参考文献	12

第 1 章 はじめに

1.1 前年度の成果

近年、過去の大量のデータを用いて、未来の状況や結果を予測する技術が必要とされてきている。そこで我々は、複雑な現象を読み解き、未来を予測する方法として、数理モデルに着目した。数理モデルを学習する上で、馬の歩行・走行を題材とした。馬の動きに着目した理由は、アニメーション作成において、馬を描くことが難しいからである。馬を描くことが難しいのは、馬が動いた時に動かしている部位が多いことが主な要因であり、さらに、馬の大群ともなると、人の力だけで作画するには、大きな負担となる。そこで、数理モデル化された動く馬の骨組みのようなものを製作すれば、馬を描く時の補助になると考えた。本プロジェクト学習では、馬の動きを数理モデル化することを通して、数理モデルの学習を目的とする。

(※文責: 鈴木流人)

1.2 先行研究

人間の動きの数理モデル化については長年研究されているが、馬の動きの数理モデル化の例は見られなかった。そのため、人間の動きの数理モデル化の研究を参考にすることにした。荒井ら [1] は、人間の足の動きを単振り子とみなし数理モデル化する手法の妥当性を検証した。荒井らは、まず、粘性減衰を含む単振り子の運動方程式を求め、線形加速度法を用いて解析値を出力した。次に、足にマーカーを貼り付けて、ハイスピードカメラで撮影し、解析ソフトにて 3 次元座標に変換した (実測値)。この解析値と実測値を比較することで、人間の動きを単振り子とみなし数理モデル化する手法がおおむね妥当であると検証された。また、さらなる妥当性を検証するために、ものの力、床を蹴る力など外力を数理モデルに組み込むことが必要だと述べた。さらに、二重振り子の研究も必要だと述べた。

(※文責: 鈴木流人)

1.3 本研究の重要性

本研究では、研究例の少ない、人間以外の動物の動きの数理モデル化の例として馬の動きの数理モデル化を行う。さらに、本研究では、馬の実測値を動画から抽出しており、モーションキャプチャーを用いることが難しい動物の実測値を取得した研究となる。最後に、馬の動きの数理モデル化により、複雑な動きを単純な形にすることで、アニメーション作成の支援となる。

(※文責: 鈴木流人)

第 2 章 関連研究

2.1 使用したプログラム

本プロジェクトでは python を使用．必要なライブラリは numpy, pandas, scipy, open-cv, math など．

(※文責: 昆陽馨)

2.2 数理モデル

”歩行に関する人体の数理モデル化研究”では人の脚を単振り子に見立ててモデル化していたことから，馬の脚のモデルとして二重振り子を採用した。[2]．

(※文責: 昆陽馨)

2.3 数値的な微分方程式の解法

オイラー法やルンゲクッタ法を用いた．オイラー法のほうが単純であるがルンゲクッタ法がより正確であるため，ルンゲクッタ法を用いたほうが良いだろう．本学の専門科目として数値解析を受講することを推奨する．

(※文責: 昆陽馨)

2.3.1 オイラー法

h がステップ幅 (定数), f が微分方程式, x と y は変数である．初期値とステップ幅を決めることで解の軌道を求めることができる．

$$y_{i+1} = y_i + hf(x_i, y_i)$$

2.3.2 ルンゲクッタ法

オイラー法と同様に初期値とステップ幅を決めることで解の行列を求めることができる．オイラー法に比べて誤差を少なくすることができる．

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_i, y_i) \\ k_2 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right) \end{aligned}$$

$$k_4 = hf(x_i + h, y_i + k_3)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

(※文責: 樋田悠馬)

2.4 高速フーリエ変換 (FFT)

高速フーリエ変換を使うことで、離散的な波のデータから波形の周波数成分データに変換することができる。図の 2.1 の上図から下図のように変換することができる。下図においては、横軸が周波数、縦軸が振幅を表す。これにより、波形を周波数の影響度によって表すことができる。

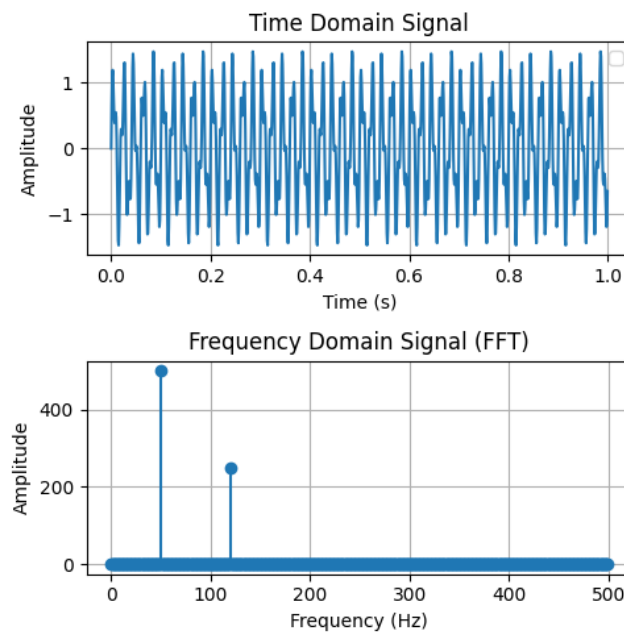


図 2.1 FFT を行った例

(※文責: 樋田悠馬)

第 3 章 プロジェクト学習の目標

本プロジェクトでは、数理モデル化の題材として馬の脚の動きに注目した。主な課題は、数理モデルをどのように構築するか、また、馬の動きにどれほど近いかをどのように評価するかについて考察することである。さらに、必要なデータを取得する方法を見つけることも重要であった。今回の目標は、馬の前脚の動きを対象とした数理モデルを構築し、シミュレーションを通じてその動きを再現することである。そして最終的な目標として、馬全体の動きを数理モデル化することを設定している。

(※文責: 昆陽馨)

第 4 章 目的を達成する手法，手段

4.1 データの取得

馬の脚の数値モデルの動きと実際の馬の脚の動きを比較し，数値モデルの妥当性を担保する必要があった．そこで，実際の馬の脚を時系列データにて取得した．馬が走っている姿を撮影した動画 [3] を用いて，数フレームごとに脚の関節の座標を取得した．

(※文責: 樋田悠馬)

4.2 二重振り子のシミュレーション

まず，二重振り子の微分方程式を導き出すために，二重振り子の系の運動エネルギーと位置エネルギー，それぞれの時間微分を求め，ラグランジュ方程式により微分方程式を立てた．最初に，二

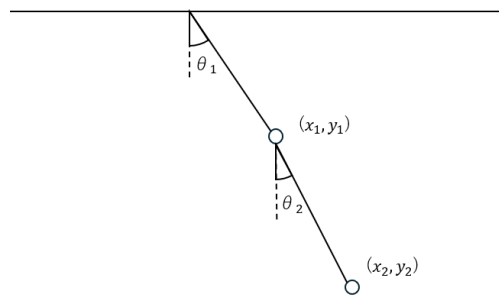


図 4.1 二重振り子

重振り子の性質から以下のように定義する．

$$(x_1, y_1) = (l_1 \sin \theta_1, l_1 \cos \theta_1)$$

$$(x_2, y_2) = (l_2 \sin \theta_1, l_2 \cos \theta_1)$$

$$(\dot{x}_1, \dot{y}_1) = (l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1, -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1)$$

$$(\dot{x}_2, \dot{y}_2) = (l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2, -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2)$$

次に，二重振り子の系の運動エネルギー，位置エネルギーを求める

$$K = \frac{1}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)$$

$$U = -m_1 g y_1 - m_2 g y_2$$

運動エネルギー，位置エネルギーからラグランジアンを求める

$$L = K - U$$

ラグランジュ方程式を解く

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0$$

解いた結果,

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{m_2 g \sin(\delta) \cos(\delta) - m_2 \sin(\delta) \left(L_1 \dot{\theta}_1^2 \cos(\delta) + L_2 \dot{\theta}_2^2 \right) - (m_1 + m_2) g \sin(\theta_1)}{L_1 (m_1 + m_2 \sin^2(\delta))}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{(m_1 + m_2) \left(L_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\delta) - g \sin(\theta_2) + g \sin(\theta_1) \cos(\delta) \right) + m_2 L_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\delta) \cos(\delta)}{L_2 (m_1 + m_2 \sin^2(\delta))}$$

これにより微分方程式を導出できる．次に，2.3 で示したオイラー法とルンゲクッタ法で解行列を作成した．オイラー法では誤差が蓄積されて，初期値によっては振り子が少しずつ大きく振れるようになってしまった．ルンゲクッタ法では，オイラー法のような問題は起きなかった．

(※文責: 樋田悠馬)

4.3 二重振り子から馬の脚の動きのモデルの作成

数値シミュレーションから馬の脚の動きに近づけるために，二重振り子の微分方程式に付加項を加える．付加項は摩擦や馬の脚の力を考慮して選択するのが良い．今回は実データを高速フーリエ変換し，特徴的な周波数を調べて，それを微調整したものと摩擦を加えた．また，制限も考える必要があるだろう．今回は実際の馬の膝のように反対に曲がらないように θ_2 の動くことができる範囲に制限をかけた．具体的な付加項は 5.2 で示す．

(※文責: 昆陽馨)

4.4 実際の馬の脚の動きとモデルの比較

今回は作成した数理モデルのシミュレーションと実データを比較して、数理モデルを改良するプロセスを繰り返す方法を取った。比較するパラメータは各関節ごとの角度である。図1のように、二重振り子の角度 θ_1 と θ_2 を、実データとシミュレーションでそれぞれ計算し、時間ごとに比較した。比較した結果を評価する方法として、(実データ) $\pm$ (任意の値) 内にシミュレーションの値がいくつ入っているか数を数え、パーセントで表示する方法をとった。図4.2は比較方法のイメージ図である。破線は範囲を示しており、点はシミュレーションの値である。

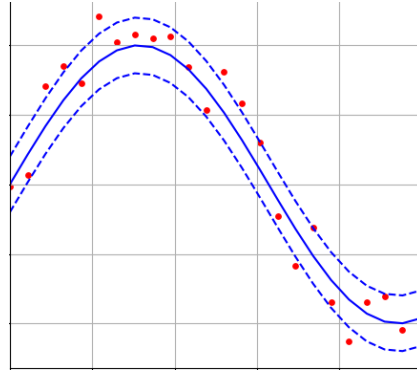


図 4.2 比較方法のイメージ

(※文責: 昆陽馨)

4.5 画像との連動によって、より最もらしいアニメーションへ

比較しながら、完成した数理モデルからアニメーションを出力することができた。しかし、アニメーションの出力は座標に用いる点が3つとそれを結ぶ線のみ、いわば骨組みのみであり、実際の馬とは程遠かった。そこで、付け根から関節までの画像と、関節から足の先までの画像の2つの画像を作成。その後、それをアニメーションと連動して動くようなプログラムを作成した。

(※文責: 鈴木流人)

第 5 章 結果

5.1 実データの取得

今回は 15 fps で 15 秒程度のデータになるように取得した。1 つ関節を持つ足を描画するのに必要な座標は 3 つだが、動画の馬は体を上下に揺らしており、描画に大きく影響する。そこで、揺れの補正を行うために、4 つ目の座標を定点として取得した。

(※文責: 昆陽馨)

5.2 前脚モデルの作成

4.2 で表した二重振り子の微分方程式に付加項を加えることで前脚モデルを作成する。付加項を加えた微分方程式は具体的には以下の通りである。

$$\ddot{\theta}_1 = \theta_1 \text{の微分方程式} + -(\theta_1 \text{の角速度}) + (7 \sin(3 * t) + 6)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \theta_2 \text{の微分方程式} + -(\theta_2 \text{の角速度}) + (9 \sin(3(t + \pi/2)) + 2 \sin(7.8(t + \pi/2)) - 3)$$

角速度の項は摩擦を表しており、調整する際はこの項に乗算を行うのが良い。また、そのあとの項は高速フーリエ変換で見つけた周波数を微調整したものであり、sin 波のみで表すことができた。完成形は以下の図である。左から脚の動きの流れを示している。

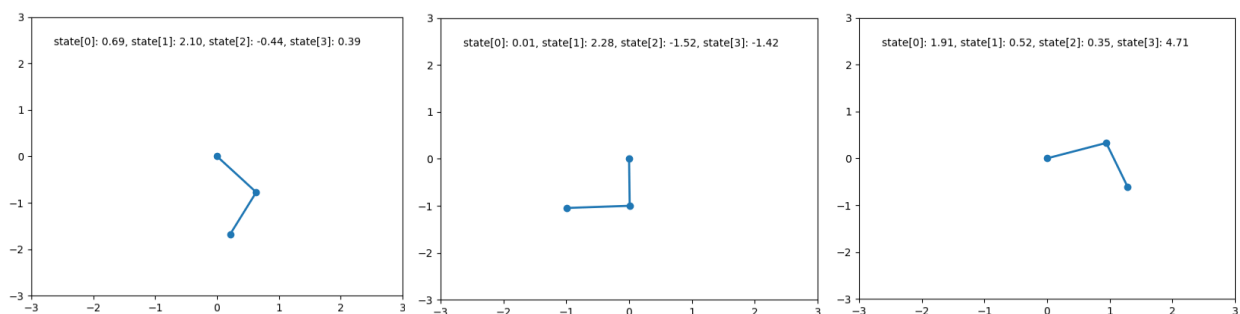


図 5.1 完成した数理モデルのシミュレーション

(※文責: 昆陽馨)

5.3 実際の馬の脚の動きとモデルの比較

以下のグラフは各関節ごとの角度変化をシミュレーションと実データとで比較したものである。結果として、(実データ) $\pm \pi/8$ 内で、 θ_1 は 94 %、 θ_2 は 55 %の一致率となった。

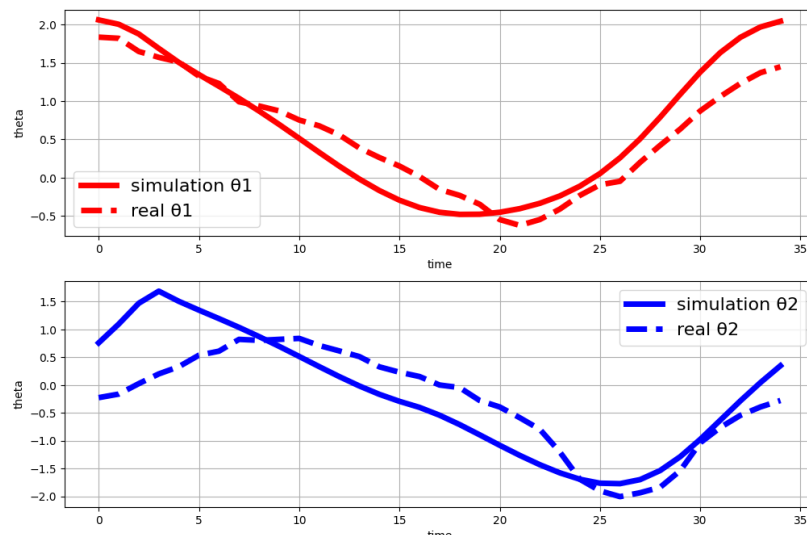


図 5.2 各関節の角度変化

(※文責: 昆陽馨)

5.4 画像との連動によって、より最もらしいアニメーションへ

馬の脚の数理モデルに、馬の脚の画像を合わせることで、より馬のようなアニメーションをつくらることができた。

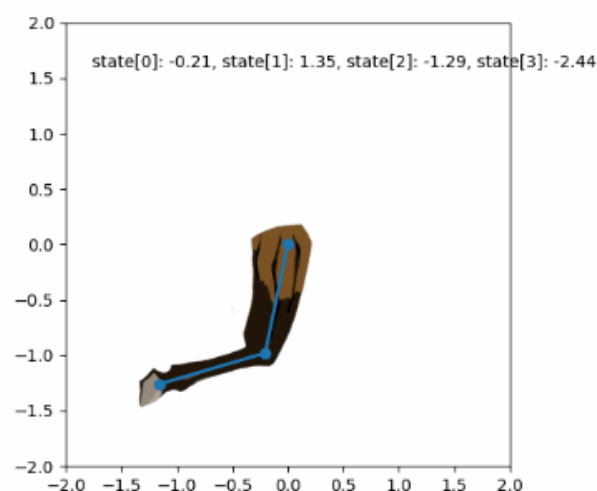


図 5.3 画像と連動させたシミュレーション

(※文責: 樋田悠馬)

第 6 章 考察

6.1 比較結果について

θ_1 は 94 パーセント, θ_2 が 52 パーセントという結果と, θ_2 の一致率があまり高い結果とはいえない. これは, θ_2 が θ_1 の周期の影響を少なからず受け続けており, その状態の θ_2 を狙った動きに近づけていくことが難しかったため, この結果となった. それでも, 見た目で何ら遜色がないのは, 人間の認知機能的に, 実際の馬との一致率が高くなかったとしても不自然感を与えることがないと考察した.

(※文責: 鈴木流人)

6.2 数理モデルの付加項について

最終的な付加項として $\sin$ 波が適しているという結果になった. これは馬が走る際に脚に前後の連続的な力を入れていると解釈することができる. ほかのモデルを作る際にも力がどう加わっているかを考えることで最適な付加項を選択することができるだろう.

(※文責: 昆陽馨)

6.3 画像を組み合わせたことの効果

4.5 で行った手法について, 骨組みだけの足よりも, 画像を付け加えたものの方が, より自然な馬の足の動きに見えるようになった. 実際, 馬の足は骨が動いているのではなく, それに連なる筋や肉が連動して動いているため, より自然に見えたのではないかと考察した.

(※文責: 鈴木流人)

6.4 今後の展望

今後の展望として, 馬の全身の動きの再現が必要である. 現在は前足の数理モデルのみであり, θ_1 と θ_2 の 2 変数のみであるが, 動きの制御が難しい. そこから完成した数理モデルに変数を付け加えていけばいくほど, 動きの予想が難しくなる. そこで, 馬を部分ごとに分解し, それぞれを数理モデル化してから, 連結する方法を取るのが良いと思われる. また, 他の部位の数理モデルを作成するとき, 我々が作成した数理モデルの作成方法を再活用することで, 前足の数理モデルの作成にかかる時間の大幅な短縮が見込める. プロジェクト学習は終了したが, いずれ馬の全身を完成させたい.

(※文責: 鈴木流人)

6.5 大学との関連

本プロジェクトでは二重振り子のシミュレーションを利用した。そのため本学の授業であるデータサイエンス入門の Python の知識、微複雑系計算論の微分方程式の数値的な解き方が必要である。

(※文責: 樋田悠馬)

6.6 今後のプロジェクトの拡張について

今回行った、馬の動きの数値モデル化により、他の動物の動きを数値モデル化する礎になるだろう。また、今回行った、動画から座標を取得しデータとして用いる方法は、モーションキャプチャーを用いる方法や画像認識による座標の自動取得よりも、比較的簡単な方法で応用可能性が高い。動物を数値モデル化する際のデータを取得する手法の一つとして検討できると思われる。

(※文責: 鈴木流入)

参考文献

- [1] 荒井美沙子, 高橋亜佑美, 美坐地一人. 歩行に関する人体の数値モデル化研究. 日本大学生産工学部第 44 回学術講演会概要, 2011, 1053-1056p.
- [2] 羽部 安史, 宇多 慶一郎, 戸部 仁貴, 福井 諭, 石原 淳也, 青島 伸一, 福岡 泰宏. 4 脚動物の歩行走行メカニズムの工学的解明. 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2016, 13-14p.
- [3] NHK. “走る馬 スピードカメラ”. NHK アーカイブス, 2008.
https://www2.nhk.or.jp/archives/movies/?id=D0002060199_00000.