

令和元年度 共同利用研究報告書

令和 2年 9月 11日

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所長 殿

所属・職名 株式会社スクウェア・エニックス・R&D テクニカルプロデューサー

提案者 氏名 長谷川 勇

下記の通り共同研究の報告をいたします。 記

		整理番号	20190016	
1.研究計画題目	ゲーム開発へのモデル検査の適用			
2.種目(○で囲む)	a. プロジェクト研究 b. 若手研究 <u>c.</u> 一般研究			
3.種別(○で囲む)	a. 研究集会 I b. 研究集会 II c. 短期共同研究 <u>d.</u> 短期研究員			
4.研究代表者	氏 名	長谷川 勇		
	所 属 部局名	株式会社スクウェア・エニックス テクノロジー推進部	職 名	R&D テクニカルプロデューサー
	連絡先	〒		
	e-mail		TEL	
5.研究実施期間	令和 1 年 6 月 19 日 (金曜日) ~ 令和 1 年 6 月 21 日 (日曜日)			
6.キーワード (複数可)	ゲーム開発, 形式手法, モデル検査			
7.参加者数	7 人 *1			

*1 短期研究員は九大の共同研究者も含める。

研究集会 I, II, 短期共同研究は事務局から送った参加者データを元に記入。

8.本研究で得られた成果の概要(成果報告書を別途要添付 枚数は次頁参照)

モデル検査のゲーム開発の適用に関し、IMI・システム情報と共同で議論を重ねた。この議論を通して、大規模・ヘテロ・密結合ソフトウェアシステムのための次世代の品質保証基盤として、抽象統一モデル(Unified Abstract Model, 以下 UAM)の研究計画を建てた。UAM は従来の検証技術で扱うモデルを圏論および関係計算により抽象化(抽象モデルレイヤ)して得られるものであり、ヘテロシステムを共通の枠組みでモデル化できる。UAM でモデル化されたシステムは、検証すべき性質と検証手段に応じてその検査用モデルへと具象化される。そのため、密結合システムであっても、着目すべき部分のみを具象化することで効率的な検証が実現でき、大規模化にも対応可能である。

また、直接の成果ではないが、ベースとなる研究を ICFEM2019 へ投稿(Hasegawa, Isamu and Yokogawa, Tomoyuki / Automatic verification for node-based visual script notation using model checking / ICFEM 2019 / LNCS 11852 pp.52-68 / 2019)した際の議論も行った。

メッシュリダクション技術に関してのディスカッションを IMI と行った。九大産学連携本部の提示する条件が民間企業として受け入れられないものだったため共同研究自体は中止となったが、IMI とは引き続き協業予定。成果の一部を CEDEC2020 で講演予定(<https://cedec.cesa.or.jp/2020/session/detail/s5e79a3e9c953a>)。

ゲーム開発へのモデル検査適用のための研究計画

モデル検査のゲーム開発への適用に関し、IMI・システム情報と共同で研究計画の立案を行った。以下に当研究計画の背景とアプローチを示す。

背景

産業界において、ソフトウェアのQA(品質保証)効率化は重要な課題である。特にゲーム開発の場合、そのソフトウェアは大規模のみならず、ヘテロ(多種実装)かつ密結合なシステムとなる。こうした理由からQAのほとんどは大量のテスターによるテストプレイによる。これは他のソフトウェアのQAと比べて非常に効率が悪く、ゲーム開発の開発コストを圧迫し、大きな経営課題である。近年AI(特に機械学習)による自動QAが注目されているが、複雑化が著しいゲームのソフトウェアに対してAIによる自動QAでは網羅性に欠けるため、十分な保証が難しい。一方で、QAにおける非常に強力な技術として形式手法の活用が進んでいるが、ゲーム開発では上述の理由からその効果を十分に発揮できていないのが現状である。

本研究が対象とするのは、大規模・ヘテロ・密結合という従来のソフトウェア工学技術の適用が困難なシステム開発におけるQA工程への形式手法の適用であり、最初のマイルストーンとして、ゲーム開発のQA工程の効率化を目指す。そして将来的には、こうした特徴を個別に持つ様々なソフトウェアシステムへと、本研究の成果を展開する(図1左)。

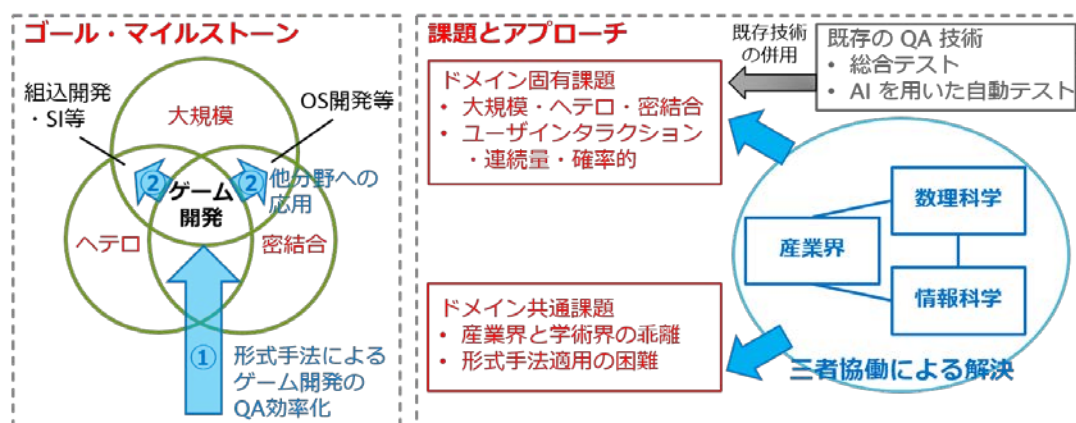


図1 本研究のゴールおよび課題とアプローチ

アプローチ

形式手法とは、数学的に厳密な形式的記述により対象システムの要求・設計・実装をモデル化し、満たすべき仕様の証明やアルゴリズム的な解析を行う技術である。そのため、論理的かつ網羅的なシステムの検証が実現できる。しかし、ゲーム開発への形式手法の適用には以下の課題が存在する。

- 大規模・ヘテロ・密結合というシステムの構造に起因する問題
- ゲーム開発というドメイン特有の問題（連続量、確率的振る舞い、ユーザーインタラクション）
- 形式手法を導入するためのコストの大きさ
- 産業界と学界の隔たり

本研究は、形式仕様記述・検証のための数理モデル構築を行う**数理基盤グループ**、検証手法の発展による課題解決を目指す**情報工学グループ**、そして、新手法研究開発へのインプットおよび、手法の実プロジェクトへの適用を主導する**産業応用グループ**の3つのグループが課題解決に取り組む。さらに本研究では、3つのグループが人的交流を含め相互に連携し、単独では成しえない研究開発を目指すことも大きな特徴である(図1右)。具体的には、研究者をスクウェア・エニックスで雇用し、産業応用グループのメンバーとして内部で実プロジェクトへの適用・評価に当たる。その後、研究者が現場の知見を持って数理基盤・情報工学各グループに移り、理論・手

法の研究開発に従事することで、従来の産学乖離の課題に対処し、また従来のキャリアパスと一線を画す研究者の育成が可能となる。

さらに本研究では、大規模・ヘテロ・密結合のシステムへ形式手法を適用するため3者協働による「抽象統一モデル(Unified Abstract Model, 以下 UAM と呼ぶ)」の構築を目指す。UAM のコンセプトおよび従来技術との位置づけを図 2 に示す。UAM に基づいたゲーム仕様のモデル化は、4 つのレイヤに分割される。ゲーム仕様の様々な側面(ゲーム仕様レイヤ)は、様々な言語で実装(ゲーム実装レイヤ)され、対応する枠組みでモデル化(検査用モデルレイヤ)され、検証される。UAM は従来の検証技術で扱うモデルを圏論および関係計算により抽象化(抽象モデルレイヤ)して得られるものであり、ヘテロシステムを共通の枠組みでモデル化できる。UAM でモデル化されたシステムは、検証すべき性質と検証手段に応じてその検査用モデルへと具象化される。そのため、密結合システムであっても、着目すべき部分のみを具象化することで効率的な検証が実現でき、大規模化にも対応可能である。さらに、インタラクティブ性・連続量・確率的振る舞いといったドメイン固有の特徴に関連する仕様を記述できるよう従来の時相論理の拡張を行うとともに、分割検証や SAT モデル検査などの効率的な検証技術を適用するためのアルゴリズムの拡張も併せて行う。ゲーム SW の意味論評価(ゲーム仕様・実装レイヤ)を産業応用 G、モデル抽出・検証(検査用モデルレイヤ)を情報工学 G、そして UAM の構築(抽象モデルレイヤ)を数理基盤 G が担当することで、3 者協働による UAM の構築が実現できる。

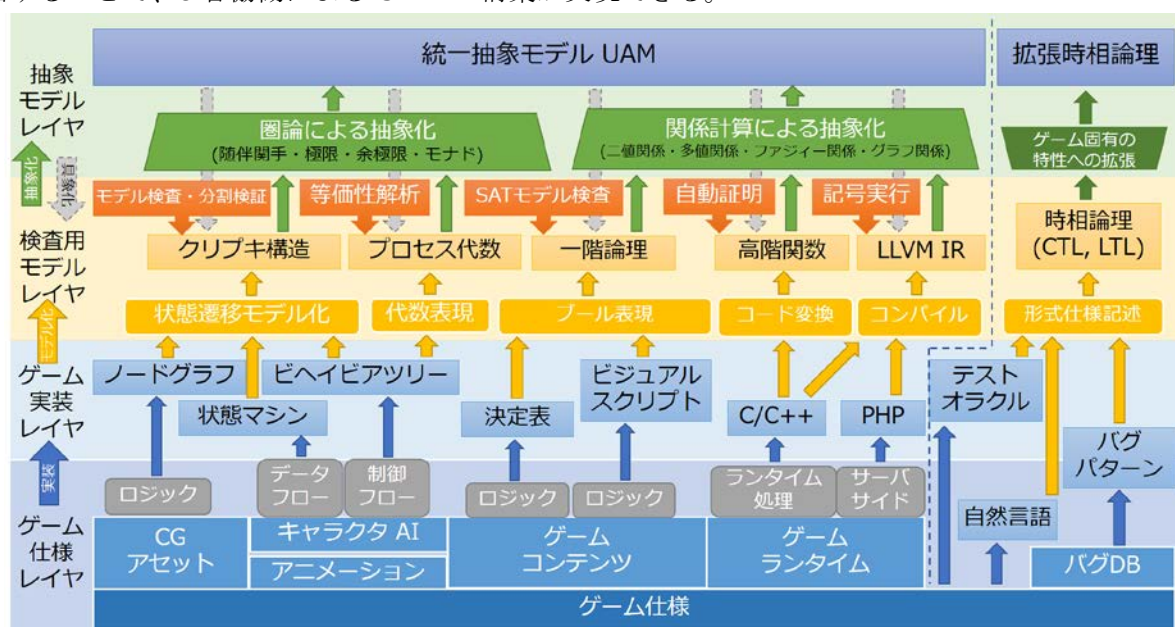


図 2 抽象統一モデル (UAM) のコンセプトおよび位置づけ

さらに、UAM および関連技術に基づくゲーム QA のフレームワークを実プロジェクトへ適用することで有効性の評価を行うとともに、課題の洗い出しや改善を図る。また、提案フレームワークの適用事例をもとに、適用テンプレートの開発を行うなどワークフローを整備し、産業界内で導入が可能となるようコモディティ化を目指す。

本研究による新手法および適用ワークフローの研究開発が実現することで、ゲーム開発過程において大きなコストのかかる、QA(品質保証)の新たな基盤を提示し、ゲーム開発環境を革新することが期待できる。近年ゲームで用いられているリアルタイム CG の処理系を CG 制作・医療・教育に転用する試みもあることから、近隣分野の QA への応用も期待できる。この成果はゲーム開発に限らず、大規模・ヘテロ・密結合といった特徴を(すべて、あるいは一部)もつシステム(例えば、エンタープライズシステム、自動車などの組込ソフトウェア、OS など)に対しても活用できると推測されることから、同様に QA 効率化が期待できる。また、UAM により DSL(ドメイン固有言語)のためのコンパイラ・編集ツール類の統一を実現することで、産業界での開発の効率化を一層進める効果も期待できる。

ICFEM2019 発表に関する議論

直接の成果ではないが、ベースとなる研究を ICFEM2019 で発表するための議論を行った。以下にスライドの抜粋を示す。

Approach

Why model checking?

- We want to verify...
 - all existing scripts in the final stage of development. (since we usually notice those typical bugs in the final stage.)
 - all scripts that we are going to write in future (updates, patches, downloadable contents, etc.)
- Standardization? ⇒ We have already tried, but...
- Unit testing? ⇒ Hard to add new test case to all scripts.
- Runtime checking? ⇒ Significant changes are undesirable.

⇒ Model checking

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

Approach

System overview

How to convert visual scripts to SMV model automatically?

Script (Node graph) → Script (SMV model) → SMV Server → Counter Example

Specification (NL) "Global flag(Event Mode must be false)" → Specification (CTL) AG(evMode = TRUE → AF(evMode = FALSE))

Input → Manual conversion → Output

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

Modeling Approach

Modeling approach

Visual script → modeling → SMV model

```
MODULE main
VAR
  ScriptStart1Out : {none, Out};
  SetEventMode2In : {none, Enable, Disable};
  SetEventMode2Out : {none, Out};
  ...
  EventMode : {true, false};
ASSIGN
  init(ScriptStart1Out) := Out;
  next(ScriptStart1Out) := none;
  init(SetEventMode2In) := none;
  next(SetEventMode2In) := case
    ScriptStart1Out = Out : Enable;
    TRUE : none;
  esac;
  init(SetEventMode2Out) := none;
  next(SetEventMode2Out) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode2In = Disable : Out;
    TRUE : none;
  esac;
  init(EventMode) := false;
  next(EventMode) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode4In = Enable : true;
    SetEventMode2In = Disable | SetEventMode4In = Disable : false;
    TRUE : EventMode;
  esac;
  ...
CTLSPEC AG(EventMode = true -> AF(EventMode = false))
```

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

Modeling Approach

Declare SMV variables for in/out

Visual script → modeling → SMV model

```
MODULE main
VAR
  ScriptStart1Out : {none, Out};
  SetEventMode2In : {none, Enable, Disable};
  SetEventMode2Out : {none, Out};
  ...
  EventMode : {true, false};
ASSIGN
  init(ScriptStart1Out) := Out;
  next(ScriptStart1Out) := none;
  init(SetEventMode2In) := none;
  next(SetEventMode2In) := case
    ScriptStart1Out = Out : Enable;
    TRUE : none;
  esac;
  init(SetEventMode2Out) := none;
  next(SetEventMode2Out) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode2In = Disable : Out;
    TRUE : none;
  esac;
  init(EventMode) := false;
  next(EventMode) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode4In = Enable : true;
    SetEventMode2In = Disable | SetEventMode4In = Disable : false;
    TRUE : EventMode;
  esac;
  ...
CTLSPEC AG(EventMode = true -> AF(EventMode = false))
```

- Define In/Out variable for node input/output.
- Value; each of in/out port name, or "none"
- "none" means that no in/out port is active.
- Describe (visual script's) control flow with (SMV variable's) value transition.

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

Modeling Visual Scripts

Step3: Apply node semantics (SetEventMode)

Visual script → modeling → SMV model

Find the corresponding node semantics and apply to SMV model.

```
MODULE main
VAR
  ScriptStart1Out : {none, Out};
  SetEventMode2In : {none, Enable, Disable};
  SetEventMode2Out : {none, Out};
  ...
  EventMode : {true, false};
ASSIGN
  init(ScriptStart1Out) := Out;
  next(ScriptStart1Out) := none;
  init(SetEventMode2In) := none;
  next(SetEventMode2In) := case
    ScriptStart1Out = Out : Enable;
    TRUE : none;
  esac;
  init(SetEventMode2Out) := none;
  next(SetEventMode2Out) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode2In = Disable : Out;
    TRUE : none;
  esac;
  init(EventMode) := false;
  next(EventMode) := case
    SetEventMode2In = Enable : true;
    SetEventMode2In = Disable : false;
    TRUE : EventMode;
  esac;
  ...
CTLSPEC AG(EventMode = true -> AF(EventMode = false))
```

```
@SetEventMode:define:output_variable
init(<output_variable>) := none;
next(<output_variable>) := case
  <input_variable> = Enable | <input_variable> = Disable : Out;
  TRUE : none;
esac;
@SetEventMode:rule:EventMode
<input_variable> = Enable : true;
<input_variable> = Disable : false;
```

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

Modeling Visual Scripts

In case of another SetEventMode

Visual script → modeling → SMV model

```
MODULE main
VAR
  SetEventMode4In : {none, Enable, Disable};
  SetEventMode4Out : {none, Out};
  ...
  EventMode : {true, false};
ASSIGN
  init(SetEventMode4Out) := none;
  next(SetEventMode4Out) := case
    SetEventMode4In = Enable | SetEventMode4In = Disable : Out;
    TRUE : none;
  esac;
  init(SetEventMode4In) := none;
  next(SetEventMode4In) := case
    SetEventMode2In = Enable | SetEventMode4In = Enable : true;
    SetEventMode2In = Disable | SetEventMode4In = Disable : false;
    TRUE : EventMode;
  esac;
  ...
CTLSPEC AG(EventMode = true -> AF(EventMode = false))
```

```
@SetEventMode:define:output_variable
init(<output_variable>) := none;
next(<output_variable>) := case
  <input_variable> = Enable | <input_variable> = Disable : Out;
  TRUE : none;
esac;
@SetEventMode:rule:EventMode
<input_variable> = Enable : true;
<input_variable> = Disable : false;
```

SQUARE CNIX  © 2019 SQUARE CNIX CO., LTD. / Okayama Prefectural University. All Rights Reserved.

CEDEC2020 講演のための課題検討

IMI と研究していたラプラシアンによるメッシュリダクション技術を利用し、CEDEC2020 向けに、ゲーム開発者向けの数学チュートリアル講演を計画した。本研究の成果として、このチュートリアル講演での課題設定およびロードマップを用いたアプローチを検討した。以下にそれらのスライドを示す。

導入：例①球面調和関数

Peter-Pike Sloan, Jan Kautz, and John Snyder.
Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments.
ACM Trans. Graph. 21, 3 (July 2002), 527–536.

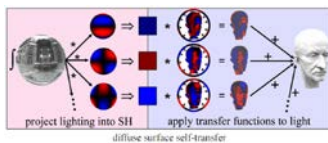


Figure 1: Precomputed, unshadowed irradiance from [34] (left) vs. our precomputed transfer (right). The right model can be rendered at 120Hz with self-shadowing and self-interreflection in any lighting environment.

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

導入：例①球面調和関数

- PRTやLPVなどで利用

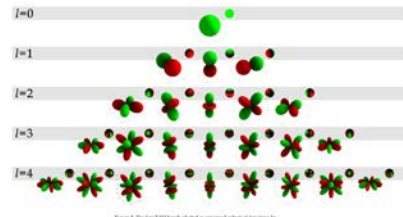


Figure 3: The direct SH basis applied as a simplified scheme of harmonic lighting. The diagram shows a hierarchy of spherical harmonics from $l=0$ to $l=4$, with increasing detail and complexity.

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

導入：例②メッシュプロセッシング

Bruno Vallet, and Bruno Lévy.
Spectral Geometry Processing with Manifold Harmonics.
Computer Graphics Forum, Wiley, 2008, 27 (2), pp.251-260.

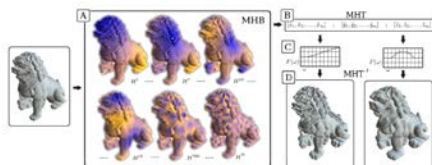


Figure 1: Processing pipeline of our method. A: Compute the Manifold Harmonic Basis (MHB) of the input triangulated mesh. B: Transform the geometry into frequency space by computing the Manifold Harmonic Transform (MHT). C: Apply the frequency space filter on the transformed geometry. D: Transform back into geometric space by computing the inverse MHT.

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

導入：例②メッシュプロセッシング

- データ圧縮
- スムージング
- 変形
- ...

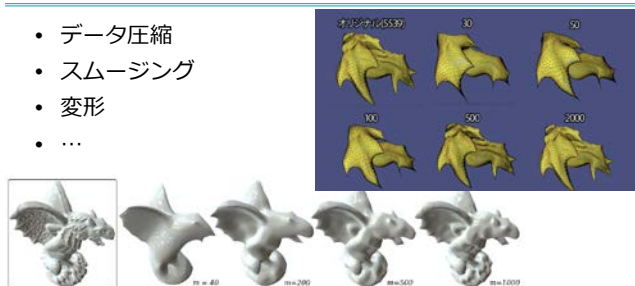
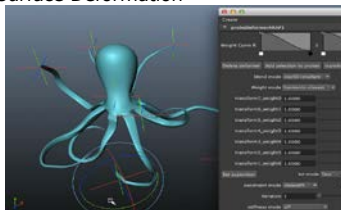


Figure 4: Reconstructives obtained with an increasing number of MH functions.

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

導入：例③Deformation

Rhaleb Zayer, Christian Rössl, Zachi Karni, and Hans-Peter Seidel
Harmonic Guidance for Surface Deformation
Euro Graphics, (2005)



S. Kaji and G. Liu, Probe-type deformers, Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis II, pp. 63–77. Springer-Japan, 2015.

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

導入：例④Poisson Image Editing

Pérez, P., Gangnet, M., and Blake, A.
Poisson image editing
ACM Trans. Graph. 22, 3 (2003), 313 - 318.



© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

行間を読むのが難しい(球面調和関数)

調和多項式 p が k 次の齊次多項式であるとき、 p を単位球面

$$S^{n-1} = \{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid \sum_{i=1}^n x_i^2 = 1\}$$

に制限した制限写像

$$Y = p|_{S^{n-1}}: S^{n-1} \rightarrow \mathbb{R}$$

を k 次の球面調和関数という[5]。

3次元空間における球面調和関数 [編集]

3次元空間 $\mathbb{R}^3$ の場合、 $\mathbb{R}^3$ を球座標 (r, θ, ϕ) で表すと、下記の $Y_k^m(\theta, \phi)$ が球面調和関数になる事が知られている。

$$Y_k^m(\theta, \phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{(2k+1)(k-m)!}{4\pi(k+m)!}} P_k^m(\cos \theta) e^{im\phi} \quad (B1)$$

出典: <https://ja.wikipedia.org/wiki/球面調和関数>

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

行間を読むのが難しい(ラプラシアン)

$$\Delta f = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) \text{ 数式は分かるけど...}$$

- 以下との違いは？

$$-\Delta f = \text{tr}(H(f))$$

$$-\Delta f = d^* df$$

$$-\Delta \alpha = d^* d\alpha + dd^* \alpha$$

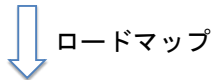
- ただの二階微分じゃないの？

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

課題・アプローチ

- 前提知識が分からない
- 行間が読めない



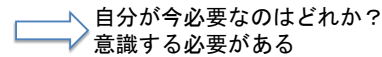
- 必要な数学知識の学び方(の一例)
- 数式間のギャップを埋める

© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

「前提知識」とは？

- 以下はすべて「前提知識」
 - 利用に必要な知識
 - 理解に必要な知識
 - 応用(研究・一般化)に必要な知識
 - 理解しなくてもよい知識



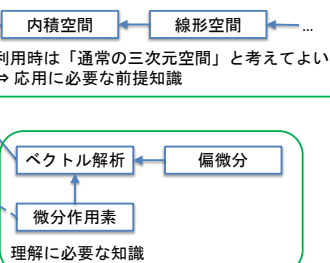
© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

前提知識の例

『ラプラス作用素は、 n 次元ユークリッド空間上の関数 f の勾配 ∇f の発散 $\nabla \cdot$ として定義される二階の微分作用素である』

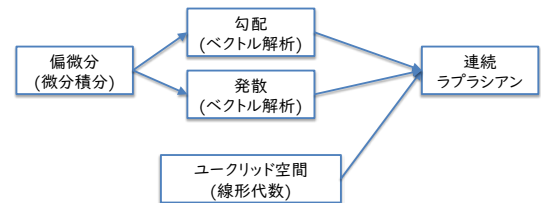
(出典: <https://ja.wikipedia.org/wiki/ラプラス作用素>)



© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

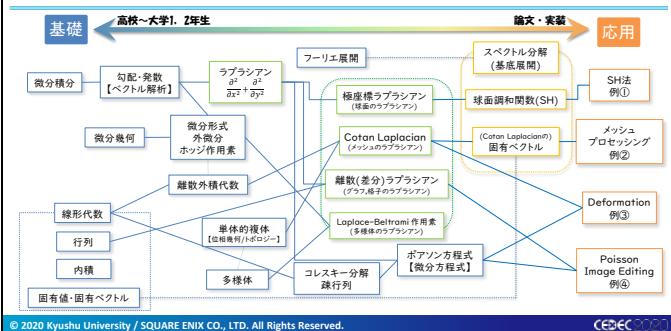
ロードマップ例: 高校数学～(連続)ラプラシアン



© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC

ロードマップ【高校数学～ラプラシアン】



© 2020 Kyushu University / SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

CEDEC