

京都大学大学院教育支援機構SPRINGプログラム（通常枠）
京都大学大学院教育支援機構次世代AIプログラム（通常枠）
①申請書 ②次世代AI補足説明書1 ③次世代AI補足説明書2

氏名	Guoqing ZHANG
研究題目	A Multi-Agent Reinforcement Learning Approach to Virtual Hospital Council Governance under Control-Theoretic Constraints

① 申請書（全員必須）
※機構次世代AIプログラムでの採用を希望する者は、機構SPRINGプログラムの選考後、機構次世代AIプログラムでの追加審査が行われることを考慮して本申請書を作成すること

1. 申請者情報：業績（学術論文、研究発表、その他）

学術論文

採録決定済み
范梦月, 姚琳, Zhang, G., 王瑞雪, Chen, K., Fan, Y., Wang, Z., Fu, J., 陈永君, & 王泰一.
Study on sub-typing and traditional Chinese medicine treatment of depression based on machine learning and text mining.
Journal of Traditional Chinese Medicine (JTCM). Accepted for publication, 2024.

研究発表（国内学会）

Poster（査読なし）
Guoqing ZHANG, Keita Fukuyama, Kazumasa Kishimoto, Tomohiro Kuroda.
Long Electronic Medical Record Summarization with Dynamic Minimize Entropy Decoding for LLM.
Japan Association for Medical Informatics Nursing Informatics, Tokyo, Japan, 2024.

Oral（査読なし）
Guoqing ZHANG, Keita Fukuyama, Kazumasa Kishimoto, Tomohiro Kuroda.
Mitigating Context Loss in Clinical Notes Auto-Summarization through Information Theory-Based Dynamic Decoding.
44th Joint Conference of the Japanese Association of Medical Informatics, Fukuoka, Japan, 2024.

Oral（査読あり）
Guoqing Zhang, Keita Fukuyama, Kazumasa Kishimoto, Tomohiro Kuroda.
Optimizing Automatic Summarization of Long Clinical Records Using Dynamic Context Extension: Testing and Evaluation of the NBCE Method.
信学技報 (IEICE Technical Report), vol. 124, no. 302, NLC2024-25, pp. 35-40, Dec. 2024.

その他（特許・受賞等）
受賞

- Second Prize, China National Chemistry Olympiad (Preliminary)
- Nishimura International Scholarship Foundation, Scholarship Student (Spring 2023)
- Third Prize, China College Students Service Outsourcing Innovation and Entrepreneurship Competition (Eastern Regional Competition, Enterprise Project Category) Organized by Ministry of Education PRC, Ministry of Commerce PRC, and Wuxi Municipal People's Government June 2021
- Second Prize, China College Students Service Outsourcing Innovation and Entrepreneurship Competition (Enterprise Project Category) Organized by Ministry of Education PRC, Ministry of Commerce PRC, and Wuxi Municipal People's Government 2020
- Second-Class Scholarship, Shandong University of Traditional Chinese Medicine Academic Year 2019-2020

2. 研究計画

(1) 研究の位置づけ

1. 研究背景

日本社会は世界に先駆けて高齢化と医療費の増大に直面しており、医療資源を効率的に配分しつつ倫理原則を守ることが喫緊の課題である。従来の病院経営モデルは経済性偏重に陥りやすく、多主体（医師・研修医・行政・会計・患者）の利害調整は困難である。この課題は単なる運営問題ではなく、「倫理・知識・資源」という異質な要素を安定的に統合するシステム設計の問題でもある。

2. 着想の経緯

私はこの課題に対し、プラトンの『国家（理想国）』に示された「各司其職」や「魂の三分説」を参照し、これを制御工学のフィードバック理論に翻訳した。具体的には仮想病院 Kallipolis Medical Republic を構築し、理性＝医師、激情＝研修医、欲望＝会計、直観＝患者代表と対応付けることで、哲学的理念を数理モデルへ写像した。この手法により、抽象的な「正義」や「調和」を安定性解析や最適化の枠組みで検証可能にした点が独自性である。

本研究における多主体（専門医、研修医、会計・行政、患者代表）は、病院運営モデル“Kallipolis Medical Republic”内で各自の戦略（勤務スケジュール、資源配分、投票行動など）を更新する。これらの戦略更新プロセスは、局所情報に基づく分散型制御律（distributed control law）として抽象化可能である。各主体は自らの局所報酬や議会投票の状況を観測し、行動を逐次調整する点で、制御理論における状態フィードバックや前向き補償器に相当する。

さらに、病院運営システム全体の安定性解析には李雅普ノフ関数（Lyapunov function）を導入できる。具体的には、潜在関数や社会的効用関数を候補とし、議会合意形成や倫理遵守度の偏差が時間とともに減衰することを確認することで、システムの安定性・漸近収束性を定量化できる。この手法により、外部擾乱（政策変更や感染症流行）下でも、研修医・患者代表を含む多主体システムが倫理・専門性・教育性を保持しつつ効率的な資源配分を実現できることを保証する。

まとめると、本研究は博弈学習動力学を分布式制御律として捉え、李雅普ノフ安定性解析を通じて多主体病院運営モデルの信頼性・安定性を数理的に検証する学際的アプローチであり、医療DXや多代理AIシステムへの応用に道を開く。

3. 研究の意義と日本社会への貢献

- 持続可能な医療：資源配分の効率性と公正性を両立する病院運営モデルを提示。
- 教育的価値：研修医を議会に組み込み、知識継承と人材育成を制度的に保障。
- 患者中心の医療：患者代表を制度化し、社会的責任と倫理的正当性を担保。
- 産業競争力強化：マルチエージェント制御や医療DXへの応用により、日本発のイノベーション創出に貢献。

2. 研究計画（続き）

(2) 研究目的・内容等

1. 研究目的

日本の医療システムは急速な高齢化や医療費増大に直面しており、限られた資源を効率的に配分しながら、生命倫理原則を堅持する仕組みの構築が喫緊の課題となっている。従来の病院経営モデルは経済効率や行政政策に偏重しやすく、多主体（専門医、研修医、行政、会計、患者）の利害調整は困難である。

本研究の目的は、プラトン哲学に基づく「正義（各司其職）」の理念を制御工学とマルチエージェント強化学習の枠組みに翻訳し、仮想病院モデル"Kallipolis Medical Republic"を設計・解析することで、倫理と資源配分の両立を数理的に保証できる動的な病院運営モデルを提示することである。特に、神聖法典（Holy Code）を共有コンテキスト（Shared Context）として実装し、議会の合意形成を通じてその進化を可能とすることで、外部擾乱に対するシステムの適応性と頑健性を確保する。

2. 研究方法

哲学的理念の数理モデル化：

プラトンの「魂の三分説（理性・激情・欲望）」を、医師・研修医・会計/政府に対応付ける。新たに「患者代表」を加え、患者中心性を制度化する。これらを十人議会モデルとして、投票重みを制御ゲインに写像する。

十人議会モデル（病院運営の中核）：

決定規則：重要事項は合計12票以上で承認。医師群（合計9票）が理性の主導権を持ちつつ、研修医と患者代表が教育性と患者中心性を補強する。

制御工学的対応関係：

神聖法典（Holy Code）＝ 動的参照入力生成器 & 共有制約集合

神聖法典を静的な目標値ではなく、共有コンテキスト内の動的な規則集合として再定義する：

$$HC(t) = \{(R_1, W_1, C_1), (R_2, W_2, C_2), \dots, (R_k, W_k, C_k)\}$$

ここで、 R_i は規則邏輯関数、 W_i は重要度重み、 C_i は適用コンテキストである。理想状態 $r(t)$ は現状の擾乱 $d(t)$ に応じて動的に生成される： $r(t) = \Psi(HC(t), d(t))$ 。

十人議会 = メタ制御器（Meta-Controller）

議会の主要機能を、資源配分の決定だけでなく、神聖法典 $HC(t)$ 自体の改訂を行うメタ制御器として再定義する。議会は以下の最適化問題を解く：

$$HC(t+1) = \operatorname{argmax} E[U(x(\infty)) | HC, d(t)]$$

ただし、 $U(x)$ は資源効用関数： $U(x) = \alpha \cdot m(x) + \beta \cdot (1-f(x)) + \gamma \cdot e(x) + \dots$ である。

研修医・患者代表 = 分散型状態観測器 & 適応型フィードフォワード補償器

これらの主体は、現場の状態 $x(t)$ を観測するだけでなく、将来の擾乱を予測し、神聖法典の改訂提案 π_{modify} を生成する。その提案は資源配分効率 ΔU の定量見積りに基づく必要がある。

政策変動・感染症流行 = コンテキストスイッチ切替擾乱

擾乱 $d(t)$ を、神聖法典内の適用規則集合を切り替える信号として定義する。例えば、 $d(t) = \{\text{"type": "Pandemic", "severity": 0.8}\}$ は、 $C_i = \text{"Pandemic"}$ の規則を活性化する。

専門医群 = リャプノフ安定化主制御器

専門医群は、提案された資源配分が動的李雅普諾夫関数 $V(x) = e^T P e$ （ここで $e(t) = x(t) - r(t)$ ）の安定条件 $\Delta V(e) < 0$ を満たすことを確保する。さらに、核心的な倫理規則 $\phi_{\text{core}}(x)$ に対する違反が発生しないことを保証する。

制御工学的解析：

議会合意形成：状態ベクトルの収束を、Consensus Convergence Rate (CCR) で定量化。李雅普諾夫関数 $V(e)$ の減衰率で評価。

外部擾乱に対する抗擾乱性： H^∞ ノルムに加え、Disturbance Adaptation Time (DAT) で評価。DATは擾乱開始から神聖法典が適切に更新され、資源効用 $U(x)$ が回復するまでの時間とする。

神聖法典のルール更新：制御器のオンライン再設計プロセスとしてモデル化。規則の重み W_i の調整は制御ゲインの調整に対応。

シミュレーションとケーススタディ

想定シナリオ：「補助金30%削減」「感染症 $R_0=1.6$ 」「財政赤字急増」。

実行結果を TTC (Time-to-Consensus)、DAR (Disturbance Attenuation Ratio)、加えて、規則更新成功率 (Rule Update Success Rate, RUSR) と資源効用回復時間 (Resource Utility Recovery Time, RURT) で評価する。

3. 研究内容

1. 議会合意メカニズムの数理解析：合意形成の収束条件を、投票重み分布と李雅普諾夫安定性条件の観点から解析する。

2. 外部擾乱下のルール進化の動的モデリング：擾乱の検出から、規則改訂提案の生成、合意形成を経て、神聖法典が更新されるまでの過程を形式的にモデル化する。この適応的学習サイクルの再発防止効果を評価する。

3. 患者中心性と教育性の制度的組込の効果測定：研修医と患者代表をメタ制御ループに組み込むことが、長期の資源効用 $U(x)$ と社会的信頼 $p(t)$ に与える効果を定量化する。

4. 研究の特色・独創性

1. 学際的統合：哲学（倫理）× 制御工学（数理モデル）× 計算機科学（マルチエージェント強化学習）× 医学・医療政策（実

践)を架橋する。

2.理念の動的形式化: 静的な「正義」を、共有コンテキストを通じて進化する「動的安定性」として定式化し、制御理論とアルゴリズムで検証可能にした点に独創性がある。

3.制度設計の評価手法: 議会と神聖法典を「制御器」と「制御器設計プロセス」とみなす新しいパラダイムを提案し、その性能をシミュレーションで評価する。

4.将来展望: 医療DX (適応型マルチエージェント病院管理AI)、危機における資源配分アルゴリズム、規範が進化するAIシステムの基礎理論への応用が期待される。

5. 申請者の担当部分

哲学理念と工学的モデルの写像設計。神聖法典の動的モデルと合意形成プロセスの数理解モデル構築。李雅普諾フ安定性解析。擾乱シナリオに基づくシミュレーション設計と評価。全ての数理解モデルと計算機実装を担当する。

6. 研究計画の展望

【1年目: 基礎モデルの構築と理論的検証】

第1-3四半期 (Q1-Q3):

Q1: 動的な神聖法典HC(t)の形式的定義と数学的枠組みの確立。共有コンテキストのデータ構造及びインターフェース設計。

Q2: 十人議会のメタ制御器としての振る舞いを規定する合意形成アルゴリズムのプロトタイプ実装。李雅普諾フ安定性解析のための基礎式の導出。

Q3: 擾乱が存在しない基本シナリオにおけるシミュレーション環境の構築。状態ベクトル $x(t)$ の基準状態への収束性を、Consensus Convergence Rate (CCR) を用いて検証。

第4四半期 (Q4):

1年目の成果のとりまとめ。国内研究会での研究発表。学術論文1本の執筆開始 (モデル構築と基礎安定性解析に関するもの)。

【2年目: 適応性と頑健性の評価】

第5-6四半期 (Q5-Q6):

Q5: 単一擾乱 (「補助金30%削減」) を導入。神聖法典の規則更新プロトコル Ω の実装とテスト。資源効用関数 $U(x)$ の定義と定量評価。

Q6: 複合擾乱 (「感染症 $R_0=1.6$ 」と「財政赤字急増」の同時発生) への拡張。適応度指標 (Disturbance Adaptation Time - DAT, Rule Update Success Rate - RUSR) に基づくシステム性能の評価。

第7四半期 (Q7):

パラメータ感度分析と相関解析の実施。システムの安定領域と破綻条件 (例えば、特定の投票権重みの組み合わせ下での合意不能) を明らかにする。

第8四半期 (Q8):

2年目の成果のとりまとめ。国際会議での発表。学術論文1本の執筆・投稿 (適応メカニズムと頑健性解析に関するもの)。

【3年目: 実データ連携と一般化・社会実装へ】

第9四半期 (Q9):

実データ (病床稼働率、救急患者数、標準的な診療報酬点数等) の収集と前処理。シミュレーションモデルのパラメータチューニング。

第10四半期 (Q10):

実データを入力とした検証シミュレーションの実施。提案モデルが現実の医療運用課題に対して有効な示唆を与え得るかを評価。

第11四半期 (Q11):

研究成果の一般化。本研究で開発した「合意形成による規範進化を伴うマルチエージェント制御フレームワーク」が、他の公共資源配分問題 (災害時救援物資分配、地域エネルギー管理など) に応用可能か検討。

第12四半期 (Q12):

博士論文の執筆ととりまとめ。最終成果発表会の実施。研究プロジェクトの全体像と学術的・社会的貢献をまとめた総説論文の執筆。

この3年間の研究を通じて、哲学的理念に基づく理想的な医療ガバナンスの数理解モデルを構築するとともに、その有効性を計算機シミュレーションによって実証し、将来の医療DXを支える次世代AIシステムの基盤技術の確立を目指す。

② 次世代AI補足説明書 1（留学生）

- *機構次世代AIプログラムでの申請資格を有し、同プログラムでの採用を希望する留学生は記載すること
- *留学生は、自分の研究が日本のイノベーション創出や日本の産業競争力強化のためにどのように貢献するか説明すること

私は京都大学において、医療AIおよびマルチエージェント制御を用いた病院運営モデルの研究を行う留学生です。本研究は、医療資源の効率的配分と生命倫理原則の両立を目指し、哲学的理念（プラトンの「正義」）を制御工学的枠組みに翻訳した「Kallipolis Medical Republic」モデルの設計・解析を通じて、医療システムの安定性と社会的信頼性を数理的に検証します。

1. 日本のイノベーション創出への貢献

医療DX（デジタルトランスフォーメーション）の推進：長文電子カルテの自動要約や多主体意思決定支援システムにより、医療現場の効率化と安全性向上を実現。

制度・ルール設計の数理的評価：議会ダイナミクスを制御器設計に翻訳し、外部擾乱（政策変動、感染症流行）下でも合意形成が可能な運営モデルを開発。

教育的価値の実装：研修医を議会要素として組み込むことで、知識継承・人材育成を制度化。

2. 日本の産業競争力強化への貢献

高度AI技術の社会実装：多代理学習・強化学習を活用し、医療資源配分・看護スケジュール最適化を行うシステム設計。

日本発の技術標準化と国際競争力向上：医療AIの信頼性・効率性評価手法を確立し、国内外の医療機関や企業への応用を促進。

イノベーション創出基盤の提供：シミュレーション結果や数理モデルを元に、新規医療サービスやアルゴリズム開発に応用可能。

哲学理念と制御工学を融合する学際的アプローチにより、従来の病院運営モデルでは困難であった倫理・資源・教育の統合的最適化を実現。日本国内の医療制度改善だけでなく、国際競争力強化にも寄与可能。

以上により、私の研究は日本の医療DX推進、医療AIの信頼性向上、および医療産業の国際競争力強化に直接貢献すると考えています。

③ 次世代AI補足説明書2（該当者のみ）

- ※前年度実施の機構SPRINGプログラム進学前採用枠の内定者で、機構次世代AIプログラムへの応募を希望する場合のみ提出すること
- ※採用当時の研究計画からの進捗状況等を記載すること
- ※当時の研究計画が次世代AI分野でない場合は、計画の変更点や今後の方針を記載すること

以下の説明文は削除しても差し支えありません。

- ・ 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。
- ・ 本項目は1頁に収めてください。
- ・ フォントサイズやカラー・白黒、レイアウトは自由です。