

[研究助成 (A)]

「素早く，安全に，そして滑らかに」：人間と調和可能な移動体群の自律分散制御

Quickly, safely, and smoothly : Decentralized control of mobile agents that can cooperate with humans

2191005



研究代表者	東北大学 電気通信研究所	准教授	加納 剛 史
共同研究者	同志社大学 文化情報学部	准教授	岩本 真裕子
	武蔵野大学 工学部	教授	上山 大 信
	広島大学 大学院統合生命科学研究科	特任助教	山田 恭 史
	東北大学 電気通信研究所	教授	石黒 章 夫

[研究の目的]

本研究では，多数の運搬物を各目的地まで「素早く，安全に，滑らかに」輸送する移動体群の自律分散制御手法を提案する。ここで「移動体」とは，倉庫で荷物を運ぶロボット，道路を走る自動運転車，空を飛ぶドローンなど多岐に渡るが，それらに共通する設計原理の構築を目指す。移動体は，他の移動体や障害物と衝突回避する必要がある一方，衝突回避をすると頻繁な加減速により輸送効率が落ちるというジレンマを有する。このジレンマを，歩行者流のモデルを起点とした自律分散制御則の構築により

解決する。さらに，移動体の間に人間が割り込んでも高い安全性や輸送効率を保証できる，人間と調和可能な人工物システムの実現へと道を切り拓く（図1）。

[研究の内容，成果]

(1) 制御則の構築

本研究期間内では，詳細に立ち入った現実的な問題を考えるのではなく，将来に向けての基礎固めとして「制御則の核心部を確立する」ことを目標とした。最小限の設定に基づいた考察をするため，混雑した状況でもスムーズに相手を交わしながら目的地に向かって進むことができる歩行者に着目した。歩行者流のミニマルモデルとして Social force モデル（以下 SF モデル）[1] が知られているため，このモデルを起点に考察を行った。

SF モデルは，歩行者を自己駆動粒子とみなし，その運動方程式を記述した動力学モデルである。具体的には，以下の式で記述される：

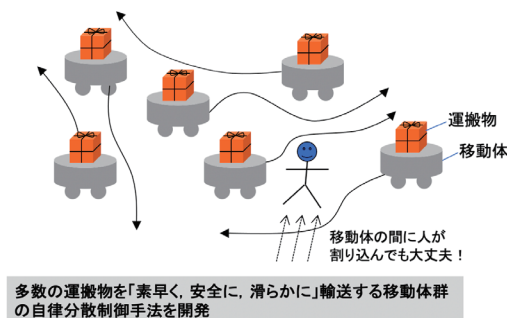


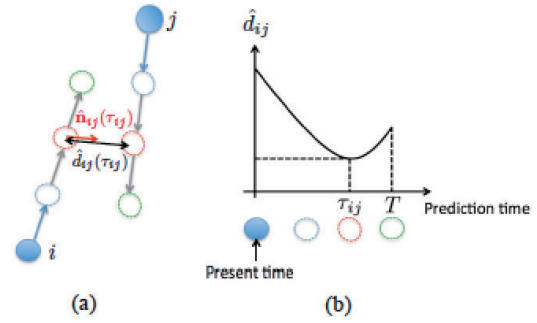
図1 本研究の概要

$$m\ddot{\mathbf{x}}_i = a(v_0 \mathbf{e}_i - \dot{\mathbf{x}}_i) + \sum_{j \neq i} (\mathbf{f}_{ij}^{phys} + \mathbf{f}_{ij}^{soc}) + \sum_b (\mathbf{f}_{ib}^{phys} + \mathbf{f}_{ib}^{soc})$$

ここで、 m は質量、 a は正の定数、 v_0 は目標速度、 $\mathbf{e}_i$ は目標進行方向を表す単位ベクトルである。右辺第一項は素子の自己駆動力を表す。第二項は周囲の素子との相互作用を表し、接触した際に働く物理的な反発力と摩擦力 (physical force) $\mathbf{f}_{ij}^{phys}$ と接触を避けようとする心理的な反発力 (social force) $\mathbf{f}_{ij}^{soc}$ から成る。第三項は壁や障害物との相互作用を表す (physical force と social force の具体的な関数形はここでは省略する)。本研究では、SF モデルにおける social force の項を移動体への制御入力として考え、モデルの改変を行うこととした。

「①他の移動体と衝突しない、②素早く目的地に到達可能、③加減速が少ない」の3つの要請を満たすためには、各移動体が近傍の移動体の動きを予測し、衝突の危険性がある時のみ回避をすれば良い。そこで、従来の social force の項に予測項を追加した。予測項の具体的な設計指針は以下の通りである：

- Step 1: 一定時間間隔ごとに、各移動体は近傍の移動体の位置と速度ベクトルを検出する。
- Step 2: 近傍の移動体が現在から T 秒間にどのように動くかを、検出した情報をもとに予測する。具体的には、検出した移動体の位置と速度を初期条件として、SF モデルから相互作用の項を取り除いた式を数値計算により解き、近い将来の近傍の移動体の挙動を予測する (図2(a))。
- Step 3: Step 2 をもとに、近傍の移動体が自身に再接近する (もしくは衝突する) までの時間を求める (図2(b))。
- Step 4: 最接近するまでの時間とその時の相対位置をもとに、回避力 (移動体への制御入力) を算出する。接近が差し迫っているほど、また最接近時の車間距離



(a) SF モデルを用いて近傍の車の動きを予測する
(b) 最接近するまでの時間とその時の車間距離を求める

図2 提案モデルの概要

が小さいほど大きな回避力を発生させる。

(2) シミュレーション

上記モデルを用い、シミュレーションを行った。障害物なし・周期境界条件のもと、排除体積効果として記述される従来の Social force 項の係数 A と今回新提案した予測項の係数 C の値を様々に変化させ、各車の進みたい方向がランダムな場合と同じ場合の2パターンについて調べた。「速さ」、「動きの滑らかさ」、「安全性」の評価指標として、車が出し得る最高速度と実際に出した速度の差分の平均 E_1 、加減速のノルムの平均 E_2 、physical force の絶対値の平均 E_3 をそれぞれ用いた。これらの指標の値が小さな時、良いパフォーマンスであると言える。

結果を図3に示す。 A が大きく C が小さな領域で E_1 は大きくなっている。 A と C がともに小さな領域で E_3 は大きくなっている。このことから、従来の Social Force モデル ($C=0$) では、 A が大きいと「速さ」が遅くなり、小さいと「安全性」が保証されないというトレードオフの関係になっていることがわかる。一方、「滑らかさ」の指標である E_2 は、 A が小さく C が適度な値を持つ時に小さくなっている。このことから、今回提案した予測項が働くことで滑らかな動きが実現されることがわかる。図3の矢印で示した付近のパラメータでは、 E_1 、 E_2 、 E_3 のいずれも小さな値を取っており、「速

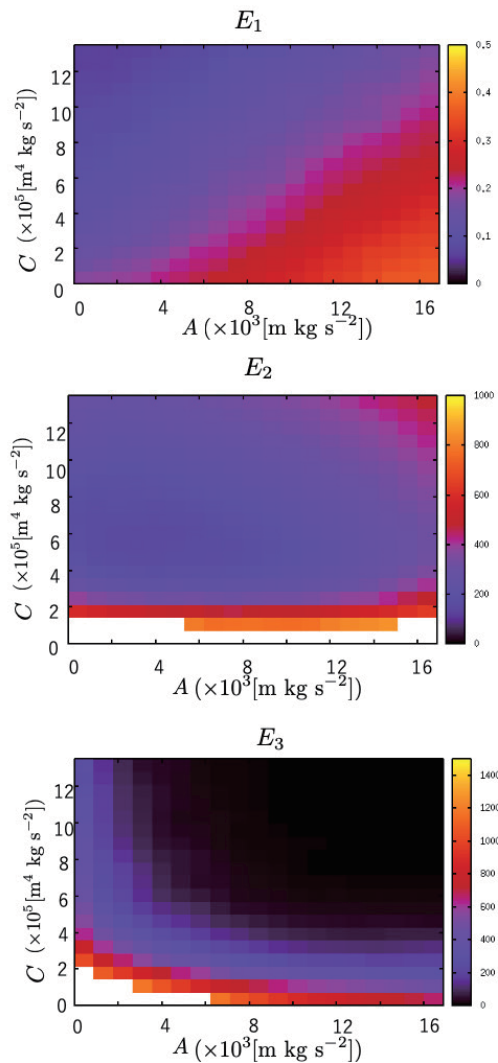


図3 シミュレーション結果

さ」「滑らかさ」「安全性」のすべてを満たしていると言える。

(3) 制御則の改良

上述の制御則は、「素早さ、滑らかさ、安全性」を実現できた点で意義深い。しかしながら、この制御則を実世界のハードウェアに実装するのは困難である。なぜなら、各移動体は近傍の移動体すべての位置と速度ベクトルを一定時間ごとに検出してその将来の動きを予測しなければならず、計算コストが膨大になるからである。

近傍の移動体の中には、将来自身に接近して衝突する危険のある移動体もあれば、そうでない移動体もある。衝突の危険が小さい移動体を

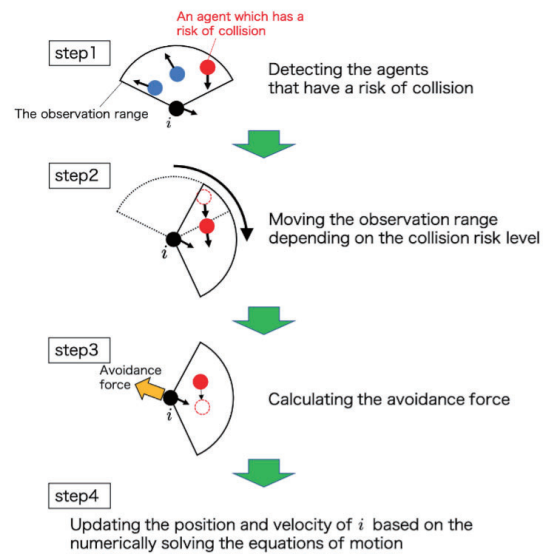


図4 改良制御則の概要

無視し、衝突の危険が大きな移動体のみに重点的に注意を払えば、計算コストを削減できるはずである。

そこで、注意の対象を適切に変化させながら障害物や他の個体との衝突を回避するコウモリ[2]に着想を得て、衝突の危険性が高い移動体に優先して注意を向けるアクティブセンシングを制御則に導入した。

各移動体は、自身を中心とする扇型の視野を持ち、視野内の移動体の位置と速度を検出できるとする。視野の中心の方向と駆動力を、以下のステップに従って制御する（図4）：

Step 1: 一定時間間隔ごとに、各移動体は視野内の移動体の位置と速度ベクトルを検出する。検出した移動体の視角の変化率をもとに、衝突危険性を定量化した「危険度」を算出する。

Step 2: 算出された危険度に基づき、扇形の視野の中心の角度を確率的に決定する。危険度が高い移動体が存在すると推測される方向付近の確率分布を大きく設定する。

Step 3: 危険度が閾値を超えている移動体について、将来の動きを予測し、回避力を計算する。

Step 4: Step 3 で得られた回避力をもとに、移動体を駆動する。

本制御則は、危険度が閾値を超えた移動体のみについて将来の動きを予測し、閾値を下回る移動体を無視しているため、計算コストを低減することが可能である。

[今後の研究の方向, 課題]

研究期間内において、多数の運搬物を各目的地まで「素早く、安全に、滑らかに」輸送する移動体群の自律分散制御手法を開発した。最初に提案した手法（上記(1)）は、シミュレーションでその有用性を確認できたが、計算コストが大きく、ハードウェア実装が困難という問題が存在した。次に提案した手法（上記(3)）は、計算コストを下げることができ、ハードウェア実装も可能だと予想されるが、現段階ではシミュレーション・実機開発ともに中途段階である。今後、シミュレータや実機を完成させ、最初に提案した制御則と同等のパフォーマンスを少ない計算コストで実現できるかを検証する予定である。

また、研究期間内では、フィールド内に移動体のみが存在する状況に限定して考察を行った

が、フィールド内に人が入り込む・移動体が突然故障する等の予測不能的な事態に対処可能な制御則へと今後発展させていきたい。

[参考文献]

- [1] D. Helbing, P. Molnar, Social force model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E* 51, 4282-4286 (1995), doi: 10.1103/PhysRevE.51.4282
- [2] 山田恭史, 伊藤賢太郎, 小林 亮, 飛龍志津子, 未知空間を飛行するコウモリの音響ナビゲーションアルゴリズムおよび自律走行車による工学的検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2A2-Q02 (2017)

[成果の発表, 論文等]

- 1. T. Kano, M. Iwamoto, D. Ueyama, Decentralised Control of Multiple Mobile Agents for Quick, Smooth, and Safe Movement, *Physica A*, 572, 125898 (2021), doi: 10.1016/j.physa.2021.125898
- 2. T. Kano, M. Iwamoto, and D. Ueyama, "Decentralized Control for Self-driving Cars Capable of Moving Fast, Smoothly, and Safely on Two-dimensional Plane," *SWARM 2019: The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, pp. 203-204 (2019)
- 3. 菅野 健, 三上大志, 山田恭史, 岩本真裕子, 上山大信, 加納剛史, 石黒章夫, アクティブセンシングを活用した複数移動体の衝突回避制御則, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 発表予定