

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350456

研究課題名(和文) 移動エージェントを用いたアドホックネットワークの自律的構成の研究

研究課題名(英文) A study on establishing ad-hoc network using mobile agents and multi-robot system

研究代表者

神林 靖 (KAMBAYASHI, Yasushi)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40269527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ネットワークインフラストラクチャが存在しない状況で、複数の移動ロボットと移動ソフトウェアエージェントにより自律的にアドホックネットワークを構築することを目的としている。発信元となるロボットは、移動エージェントを中継するロボットをアドホックな通信範囲に求めなければならない。そのために空中ロボットを採用し、空中ロボットが鳥瞰図を提供するとともに、アドホック通信の無線通信範囲よりも到達範囲の広い可視光を用いて中継ロボットを集めることで、階層的にアドホックネットワークを構築する。空中ロボットの制御と制御マシンとしてタブレット端末を用いてアドホック通信を実装することの問題点が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This project addresses constructing the ad-hoc network autonomously by two or more mobile robots and mobile software agents in the situation where the network infrastructure is unreliable. The robot, which wants to establish a communication, should request an ad-hoc communication to a robot that is within the range of the wireless communication. When the communication is established, the robot sends a mobile agent that seeks the destination robot. The requested robot should relay the mobile agent to the destination robot through an ad-hoc network. The ad-hoc network is hierarchically constructed with the collection of the relay robots. In order to call mobile robots within the wireless range, an aero-robot is employed to emit calling signal as well as to offer bird's-eye view. Through this project, the researchers have found various problems establishing an ad-hoc communication only by tablet terminals as well as controlling the aero-robot.

研究分野：複合新領域

キーワード：移動エージェント ロボット アドホックネットワーク 空中ロボット

1. 研究開始当初の背景

われわれは、移動エージェントを用いた群ロボットの制御の研究に携わってきた。種類が異なる多くのロボットを連携させ、1つのジョブを複数のタスクに分割して短時間で達成することが可能なロボット制御システムの確立を目指してきた。複数のソフトウェアエージェントを合成したり置換したりすることで機能の追加削除ができる枠組みを採用することにより、拡張可能な制御システムを構築することができた。

翻って、ソフトコンピューティングに関する研究の一環として社会性のある生物の行動を模したアルゴリズムの検討にも積極的に携わっており、有力な手法と考えるアントコロニー最適化手法について研究を進めてきた。この研究成果をユビキタス情報システムの構築に応用すると、多数のエージェントに限定的な知能と限定的な知識を持たせることで、全体として高度に知的な作業を行わせることが可能になる。これまで研究してきた移動エージェントとアントコロニー最適化手法、あるいは遺伝的アルゴリズムを組み合わせることにより、知的なロボットが実現できると考え、実機とシミュレータによる実装を行なった。エネルギーコストを最小に抑えつつ、効率的に移動ロボットを集合させると同時に整列（座標の計算に進化計算を使用）させ、かつ目標物を探索（探索するロボットの選定に進化計算を使用）させることを実現した。

従来のアントコロニー最適化手法では、アントエージェントが環境にフェロモンを付加することによりクラスタリングを行っているが、われわれの研究では、オブジェクトにフェロモンを持たせることにより、それを利用して、オブジェクトの集合状態を制御している点が独創的である。更に、フェロモンを移動エージェントとして実装することにより実際の群ロボット上で超分散処理を目指している。エージェント内にフェロモンをベクトル値としてもたせることにより、ベクトルの選択あるいは合成により、ロボットに最適な振舞いをさせる研究を進めている。すなわち集中制御を必要としない自律的な群ロボットによる分散処理である。

翻って、P2Pネットワーク上で移動エージェントを用いた資源探索の研究にも携わってきた。フェロモンを経路に付加することによって、フェロモンの強さによって経路が選択されやすくなる確率的ルーティングにより、メッセージ量を抑えつつ的確にエージェントを誘導することを目指してきた。更に、災害時における避難者の誘導をルーティング問題として定式化して解決するシステムを提案し、シミュレータ上で実装した。災害時にはネットワークインフラストラクチャが利用できないことが想定されるので、アドホックネットワークが有効であると考え、スマートフォン上に移動エージェントのルー

ティングシステムを搭載することにより、GPSを利用した避難ルート紹介システムの構築を目指している。

2. 研究の目的

これまでの移動ソフトウェアエージェントとマルチロボットシステムは、ネットワークインフラストラクチャの存在を前提としているが、災害時での運用を考慮した場合、野外でアドホックネットワークを構築した環境を前提にする必要がある。このためアントコロニー最適化手法を援用したアドホックネットワークのルーティングプロトコルについての調査研究を行った。アドホックネットワークでは、マルチアクセスのコストが非常に小さい環境とは異なり、同報通信・同時通信が困難である。またノードが移動するため、送信先の選択、送信順序の決定がパフォーマンスに大きく影響を及ぼす。またこれらの選択決定には、災害時特有のノード移動を考慮する必要がある、これまでとは異なるアドホックネットワークの構築が必要になる。これまでの移動ロボットと移動エージェントの研究、そしてアドホックネットワークの研究を統合するとともに、群ロボットを制御する通信基盤システムとして、自律的にアドホックネットワークを構成するシステムを提案した。具体的には、研究の方法で記す。

3. 研究の方法

災害等により何らかの汚染が発生し、人間の立ち入りが困難な地域に即席のネットワークを構築し、ロボット制御を支援することを目的としているので、ネットワークインフラストラクチャの不在または利用不能を想定してアドホックネットワークを構築する。アドホックネットワークは、低出力の無線の使用が可能なので、他の電子機器に影響を及ぼさないという利点もある。自律的に構成するためには、次のような問題を解決しなければならない。

- (1) 移動ロボットと移動エージェントの移動に人間が介在してはならない。
- (2) 発信元のロボットは受信先のロボットの所在を事前に知ることができない。

これらの問題を解決するために、移動ロボットと移動エージェントを次のように設計することにした。

- (1) ネットワークノードは地上ロボットによって構成する。
- (2) 地上ロボットの注意喚起と発見のために空中ロボットを導入する。

この研究では、地上ロボットにAndroidタブレットを搭載し、その上でネットワークを構成する移動ソフトウェアエージェントを

効率的にルーティングするアルゴリズムを設計し実装することにした。Android タブレットを用いるのは、試行錯誤による実装を容易にするためである。本研究を通じて、移動ソフトウェアエージェントが自律的にアドホックネットワークを構成するときの問題点を発見し、具体的に検討した上で解決方法を提案できると考えた。

ここで想定するシステムは、オブジェクトの探索を行うマルチロボットシステムである。またマルチロボットが作業を行う環境として、丘陵地帯や汚染区域など、人間の進入が難しい場所を想定している。システムは、地上を動き回り探索を行う地上ロボットと、障害物に妨げられない高い視点をもつ空中ロボットで構成される。各ロボットは移動エージェントによって制御され、アドホックネットワークを通して相互に通信を行う。ネットワークを利用するのはエージェントの移動など一時的なものであるため、動的にトポロジやリンクが変化するアドホックネットワークにおいても問題なく動作すると考えた。

本研究では、このようなマルチロボットシステムにおいて、あるロボットが通信範囲外にいるロボットと通信しようとした時に、通信を実現するためのネットワークを構築することを目的としているので、想定するシステムは、エージェントシステムが基盤にあり、常に接続されている必要はない。したがって任意の時点で任意のロボットと通信が可能だとは限らないだけでなく、その必要もないのである。

ここで用いる方法では、ネットワークを構築するために他のロボットを中継機として利用し、対象のロボットを通信可能な位置まで誘導する。また、通信範囲外にいるロボットを誘導する信号として、無線通信により長い到達距離を持つ信号を使用する。ロボットを誘導する信号は、実験を容易にするため可視光とした。ここで光を使用する理由は、電波妨害や傍受されにくい点である。電波は同周波数の強い電波によって隠蔽されてしまうが、光は完全に掻き消されない限り発光の有無や位置・方角を隠蔽されないのが有効である。実用的には、干渉に強い赤外線を用いるのが適当であろう。

各ロボットは、近距離無線機器を持ち、ネットワークを構成する。この通信システムにおいて、地上ロボットは、アドホックネットワークにおける移動ノードとして扱われる。ネットワークの接続範囲内をロボットが移動しているとき、自動的にネットワークに接続される。そしてネットワークに参加しているロボットがネットワークの接続範囲から外れるとき、ネットワークから切断される。

本研究における地上と空中のロボットの関係を、図1と図2を使って説明する。空中ロボットは、地上ロボット2を監視している。図1は、地上ロボット1が同じアドホックネ

ットワークに所属していないロボットであり、接続範囲外にいるロボットと通信を行いたいとき、自身のランプを点灯して空中ロボットに信号を送る様子を表している。空中ロボットがその信号を感知した場合、地上ロボット1の近くまで移動して自身のライトを点灯する。このライトが他のロボットを集めるための信号となる。図2は、空中ロボットが移動して発した信号を、地上ロボット2が感知する様子である。地上ロボット2は、地上ロボット1の通信範囲外に存在する他の地上ロボットである。したがってこの地上ロボット2は、信号の方向へ向かって移動を開始する。その後地上ロボット1の通信範囲内に到達してアドホックネットワークに参加すると、移動を終了する。新しくネットワークに参加した地上ロボット2が地上ロボット1の目的のロボットではない場合、空中ロボットは、地上ロボット2の上に移動し、自身のライトを点灯する。目的のロボットと通信が確立されるまで、この手順を繰り返し行う。

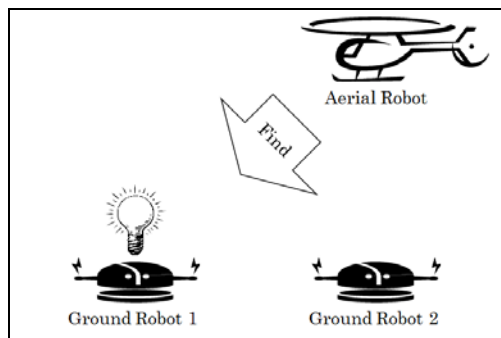


図1 移動する空中ロボットと地上ロボット

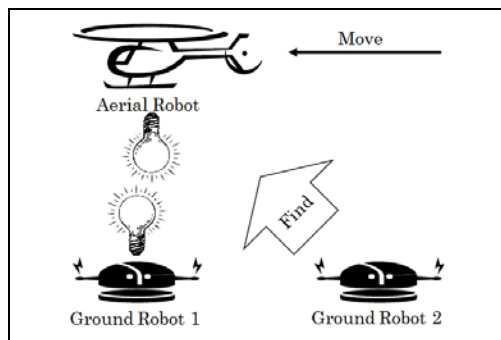


図2 地上ロボットの信号と空中ロボット

次に、図3から図5を用いてアルゴリズムを示す。図3は初期状態を表している。各丸はロボットを表し、薄い点線の円はそのロボットの通信範囲を表している。一連の図にはロボット1(R1)からロボット6(R6)の6台のロボットが存在する。R1とR2は、それぞれがもつ無線機器の接続距離内にいるので、アドホック通信を使って1つのネットワークを形成している。この2台のロボットを結んでいる線は、通信接続を意味している。移動エージェントがR1からR5に移動することができるように、R1はアドホックネットワークを作りたい。この接続要求によってシステムが

開始する。R1 は周囲のロボットを集めるための要求信号を出す。要求信号を他のロボットに伝えるため、空中ロボットは R1 の周囲に移動し、自身の光信号を放ちながら R1 のそばを離れないように滞空する。図 3 の黒い丸で表現されている R1 はこの状態を表している。R3 から R6 のロボットは、それぞれのカメラを使用して空中ロボットが光信号を発していないかを監視している。そして信号がつかないことに気づいたロボットは、その信号に向かって移動する。そのロボットは集合要求を出している R1 との接続が確立したときに停止する。

図 4 に、R3 と R4 が光信号を感知し、R1 と接続するために移動している様子を示す。移動前の R3 は R5 と接続していて、R1 の目標が R5 であるので、R3 はこれらを繰り返すために空中ロボットを呼ぶための要求信号を発信する。最終的に、要求を出した R1 と目標である R5 を結ぶアドホックネットワークが確立する。図 5 に、その様子が示す。R6 が集まってきていないのは、R3 と距離が離れていて光信号を感知できなかったからである。

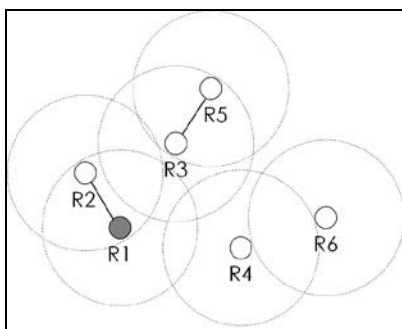


図 3 初期状態

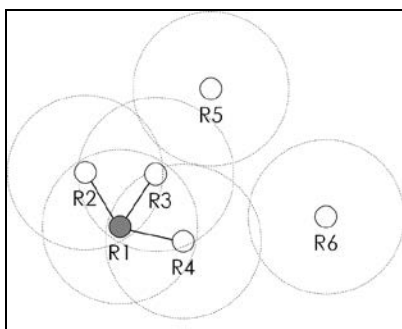


図 4 R1 に誘導された状態

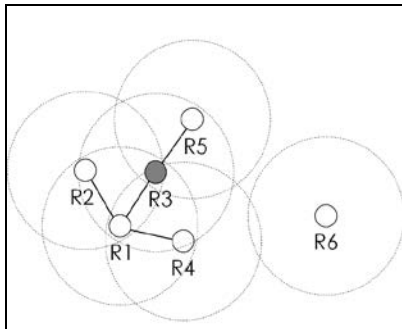


図 5 最終状態

4. 研究成果

ネットワークインフラストラクチャが存在しない状況で、複数の移動ロボットと移動ソフトウェアエージェントにより自律的にアドホックネットワークを構築するシステムを実装することが、本研究の目的であった。発信元となるロボットは、移動エージェントを中継するロボットをアドホックな通信範囲に求めなければならない。そのために空中ロボットを採用し、空中ロボットが鳥瞰図を提供するとともに、アドホック通信の無線通信範囲よりも到達範囲の広い可視光を用いて中継ロボットを集めることで、階層的にアドホックネットワークを構築することとした。本研究を通じて、自己完結的で自律的なネットワーク構築の方法論を提示できると考えた。この3年間にわたって、実際の地上ロボットと空中ロボット、そして制御マシンとしてタブレット端末を用いて実装することで問題点を発見することを中心としてきた。

複数の地上ロボット上を移動する移動ソフトウェアエージェントに追尾する形で、空中ロボットを制御し、常に移動エージェントが滞在するロボットの上空に滞空させることは早期に実現できた(図6)。しかし空中ロボットとして採用したドローンの積載能力からして、タブレット端末を搭載することができなかったため、地上ロボットからの遠隔操作ということで解決せざるを得なかった(図7)。



図 6 エージェントに伴って移動するドローン

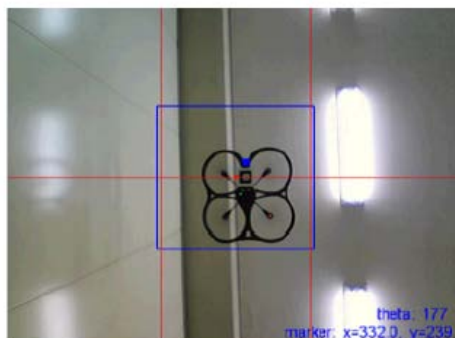


図 7 ロボットからのカメラ画像

アルゴリズムの開発については、複数のシミュレータを開発して、マルチエージェントとマルチロボットの協調動作、そして空中ロボットと地上ロボットの協調動作の仕組みを確立することができた。実機による実装としては、前述のように空中ロボットに対して注意喚起を行い、発信元のロボットの真上にホバリングすることで、周辺のロボットの注意喚起を促し、呼び寄せることはできるようになった。通信可能範囲に入ると接続し、同時に地上ロボットは停止しネットワークの構成を開始し、ソフトウェアエージェントが移動する。それに伴い、新たな注意喚起のために空中ロボットも移動する。これを繰り返すことにより、アドホックネットワークが自律的に構成されることが目標であるが、当初考えていた以上に空中ロボットの制御が難しいことが判明した。

電池の消耗度が激しい等ドローンの性能の問題と、ドローンによる実験に際して法的な規制がかけられたことにより、設計を見直す必要に迫られた。発信元のロボットを中心に同心円を描くようにアドホックネットワークを構築したいのであるが、マルチコプター形式の空中ロボットでは実装がむずかしいことが判明した。

またアドホックネットワークの構築も、採用した Nexus 7 では困難なことが判明した。アドホックに通信を確立することは確認できたし、その通信経路に沿って移動エージェントを転送することも確認した。しかしながら実用的には時間がかかることが判明した。主な問題点は市販の製品ではセキュリティに重点が置かれていることが理由である。アドホック通信の性質上一対一の接続を多数行う必要があり、接続前に接続先を効率よく選定しないと無益なオーバーヘッドが発生してしまう。

われわれが経験を積んできた移動ソフトウェアエージェントは TCP/IP の上に構築されているので、この移動エージェントシステムをアドホックベースのルーティングプロトコルを用いるものに変更しなければならない。アドホックベースのルーティングプロトコルの開発をロボットの開発と並行して進めるのは無理があったと反省している。現状では、TCP/IP による通信経路を使ってロボット間通信を行っている。これについては、Content-Centric Network (CCN) という技術を採用し、研究を継続する予定である。CCN は、IP アドレスを宛先に設定するのではなく、得たいコンテンツを指定することにより該当するコンテンツを持つ相手との通信を可能にする技術であり、われわれはこの技術をアドホックネットワーク上で利用するための改良の研究に着手している。

地上ロボットによるネットワーク構築の実装としては、分散環境下で多数の移動ロボットを編成するアルゴリズムを考案し実装

した。多数の移動ロボットが、与えられた編成を効率よく組むアルゴリズムが開発できた。編成を遂行するために、ロボットの相対位置を示すベクトルをもつフェロモンエージェントが、実際にロボットを運転するアントエージェントを誘導するという間接的かつ超分散处理的な手法を考案し実装した。

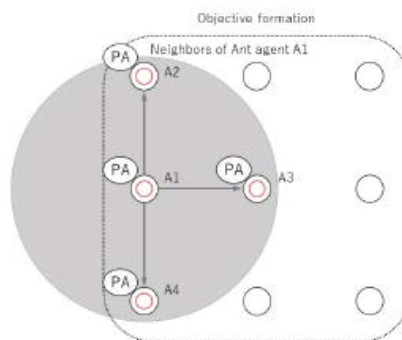


図 8 ベクトルをもつ移動エージェントによるロボット編成

今後の課題も残るが、個々の要素技術の開発とアルゴリズムの開発は完了した。今後の予定としては、飛行ロボットの制御には、カメラの視野の確保、空中での安定した停止姿勢制御等、困難な問題が多い。マルチコプター形式の空中ロボットに替えて飛行船形式の空中ロボットを作成中であり、完成すればタブレット PC を搭載することもできるので、通信が途切れた場合の自動制御の回路を組み込むことも可能だと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Ryotaro Oikawa, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Predictive Distributed Formation Control for S warm Robots Using Mobile Agents, Transactions on Automatic Control and Computer Science, 査読有, 掲載決定済
- ② Hideaki Yajima, Ryotaro Oikawa, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi, Practical Formation Control of Swarm Robots Using Mobile Agents, Proceedings of the Intelligent Systems Conference 2017, 査読有, 掲載決定済
- ③ Naoya Ishiwatari, Yasunobu Sumikawa, Munehiro Takimoto, and Yasushi Kambayashi, Cooperative Control of Multi-Robot System Using Mobile Agent for Multiple Source Localization, Proceedings of the Eighth International Conference on Swarm Intelligence, 査読有, 掲載決定済
- ④ Shiyuu Uehara, Munehiro Takimoto and

- Yasushi Kambayashi, Mobile Agent Based Obstacle Avoidance in Multi-Robot Hunting, Proceedings of the 20th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 査読有, pp.443-452, 2016.
- ⑤ Yasushi Kambayashi, Takushi Nishiyama, Tomofumi Matsuzawa and Munehiro Takimoto, An Implementation of an Ad hoc Mobile Multi-Agent System for a Safety Information, Proceedings of the Thirty-sixth International Conference on Information Systems Architecture and Technology, AISC vol. 430, 査読有, pp.201-213, 2016.
- ⑥ Ryotaro Oikawa, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Distributed Formation Control for Swarm Robots Using Mobile Agents, Proceedings of the Tenth Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, 査読有, pp.111-116, 2015.
- ⑦ Yasushi Kambayashi, Ryosuke Shibuya and Munehiro Takimoto, Multi-Agent Approach for Controlling Robots Marching in a File: a Simulation, Proceedings of the Seventh International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 査読有, pp.222-229, 2015.
- ⑧ Ko Shibata, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Expanding the Control Scope of Cooperative Multiple Robots, Proceedings of the Eighth KES International Conference on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, AISC vol. 296, 査読有, pp.17-26, 2014.
- ⑨ Naoya Ishiwatari, Yasunobu Sumikawa, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Multi-robot Hunting Using Mobile Agents, Proceedings of the Eighth KES International Conference on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, AISC vol. 296, 査読有, pp.223-232, 2014.
- ⑩ Yasushi Kambayashi, Tatsuya Shinohara and Munehiro Takimoto, Self-Optimizing Algorithms for Mobile Ad Hoc Networks Based on Multiple Mobile Agents, Proceedings of the Sixth International Conference on Agents and Artificial Intelligence, vol. 2, 査読有, pp.156-163, 2014.
- ⑪ Ryo Takahashi, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Cooperatively Transporting Unknown Objects Using Mobile Agents, Proceedings of the Sixth International Conference on Agents and Artificial Intelligence, vol. 2, 査読有, pp.60-68, 2014.

[学会発表] (計2件)

- ① 西山拓志, 松澤智史, 滝本宗宏, 神林靖, アドホックモバイルエージェントシステムの実装, 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会知的環境とセンサネットワーク研究会モバイルネットワークとアプリケーション研究会, 信学技報, vol. 114, no. 417, pp.107-112, 2015年1月27日, 南紀白浜温泉 ホテルむさし, 和歌山県西牟婁郡白浜町
- ② 柴田洸, 神林靖, 滝本宗宏, マルチロボット制御における通信範囲拡張の研究, 電子情報通信学会知能ソフトウェア研究会, 信学技報, vol. 114, no. 66, pp.1-6, 2014年5月, 慶應義塾大学日吉キャンパス

[図書] (計2件)

- ① Ryotaro Oikawa, Munehiro Takimoto, and Yasushi Kambayashi, Multi-Agent Systems and Agreement Technologies: 13th European Conference, EUMAS 2015, and Third International Conference, AT 2015, Athens, Greece, December 17-18, 2015, Revised Selected Papers, LNAI 9571, Springer International Publishing, pp.108-120, 2016.
- ② Ryo Takahashi, Munehiro Takimoto and Yasushi Kambayashi, Agents and Artificial Intelligence: 6th International Conference, ICAART 2014, Angers, France, March 6-8, 2014, Revised Selected Papers, LNAI 8946, Springer International Publishing, pp.46-62, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神林 靖 (KAMBAYASHI, Yasushi)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：40269527

(2) 研究分担者

滝本 宗宏 (TAKIMOTO, Munehiro)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号：00318205

研究分担者

松澤 智史 (MATSUZAWA, Tomofumi)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号：20385529

(3) 研究協力者

柴田 洸 (SHIBATA, Ko)