

進化計算の内外の研究動向

Recent Advances in Evolutionary Computation

石渕 久生
Hisao Ishibuchi

大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
hisaoi@cs.osakafu-u.ac.jp, <http://www.ie.osakafu-u.ac.jp/~hisaoi/>

半田 久志
Hisashi Handa

岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
handa@sdsc.it.okayama-u.ac.jp, <http://www.sdsc.it.okayama-u.ac.jp/~handa/>

keywords: evolutionary computation, impact factors of journals, acceptance rates of conferences.

Summary

Evolutionary Computation (EC) has been receiving growing attention in the last two decades. EC has been utilized practically not only in computer science but also in other areas. This paper introduces recent advances in EC by referring to the impact factors of EC journals, the acceptance rates of three major EC conferences, and the most cited Japanese papers at CiNii. In addition, active research areas in EC such as evolutionary multi-objective optimization, swarm intelligence and real-world applications are briefly described.

1. はじめに

近年, PC クラスタ, GPGPU, CPU のマルチコア化に代表されるように, 潤沢な計算資源が安価になったこともあり, 進化計算 (Evolutionary Computation) に関する研究がますます活発になっている. 進化計算は解集団による多点探索により, 大域的な探索を実現している. また, 対象問題に連続性や微分可能性を仮定する必要がないため, 幅広い分野で応用されている.

一般的な進化計算の手順を図 1 に示す. まず乱数を用いて初期集団を形成する (Initialization). 次に, 集団内の個体について適応度評価を行う (Evaluation). この評価は必ずしも数値で表現される必要はないが, 少なくとも 2 個体の優劣を決定できる必要がある. そして, 探索のループに入る. ループ内では, まず, 親個体を選択する (Select of Parents). そして, 交叉や突然変異などの遺伝演算により子個体を生成する (Crossover, Mutation). 生成された子個体は適応度評価を受ける (Evaluation). 選択により, 次世代の集団を形成する (Selection of Survivals). 終了条件を満足していなければ, ループの先頭に回り探索を続ける. これまでに様々な遺伝演算や選択方法が考案されてきただけでなく, 交叉や突然変異を用いない分布推定アルゴリズムや, 進化ではなく社会性生物をモデル化した群知能についても進化計算のコミュニティで研究が推し進められてきた.

本論文では, 論文誌や国際会議における論文数の推移やその内訳から進化計算研究の動向を概観する. また, 国内の研究者の論文で引用の多い論文を紹介し, 国内における進化計算研究の特徴づけを行う. さらに, 活発な研

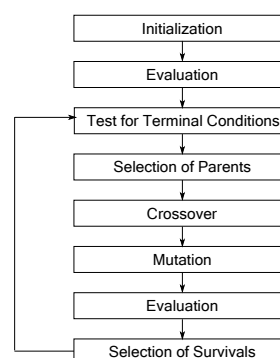


図 1 進化計算の計算手順

究領域を紹介する.

2. 研究動向

2.1 論文誌と国内・国際会議の動向

海外の主要な論文誌と国際会議を表 1 にまとめる. 論文誌では MIT Press 社が発行している Evolutionary Computation (EVC) [EVC] と IEEE Transactions on Evolutionary Computation (TEVC) [TEV] が著名な論文誌である. 表 2 にこれらのインパクトファクタを記す. 2009 年の TEVC (IF: 4.589) は Computer Science 全体 (426 誌) で 4 位となっており, EVC (IF: 3.103) は 23 位であった. いずれも非常に高い順位を示している. TEVC は, 変動はあるものの, Computer Science で上位 10 パーセント以内の順位を維持していると考えられる. また, Web of Science [WoS] で検索した引用件数の多い論文上位 100 編

表 1 主要な論文誌と国際会議 (* は隔年開催を表す)

略称	名称	期間
EVCO	Evolutionary Computation	1993–
TEVC	IEEE Transactions on Evolutionary Computation	1997–
ICGA*	International Conference on Genetic Algorithms	1985–1997
PPSN*	Parallel Problem Solving from Nature	1990–
FOGA*	Foundations of Genetic Algorithms	1991–
EP	Evolutionary Programming	1992–1998
ICEC	International Conference on Evolutionary Computation	1994–1998
GP	Genetic Programming	1996–1998
SEAL*	Simulated Evolution And Learning	1996–
EvoStar	EuroGP, EvoCop, EvoBio 等の共催の会議	1998–
ANTS*	International Conference on Swarm Intelligence	1998–
GECCO	Genetic and Evolutionary Computation Conference	1999–
CEC	Congress on Evolutionary Computation	1999–
EMO*	Evolutionary Multi-Criterion Optimization	2001–

のうち TEVC に掲載された論文は 14 件であった。TEVC には, NSGA-II や SPEA, PSO といったよく引用されている論文が掲載されており, これらがインパクトファクタを高めた要因のひとつとして考えられる。

国際会議の動向としては, 1999 年に, ICGA と GP が共催となり GECCO に, ICEC と EP も共催となり CEC となった。CEC は IEEE の Computational Intelligence Society [CIS] が主催しており, GECCO と FOGA は 2005 年より ACM の分科会 SIGEVO [SIG] が主催している。PPSN と EvoStar, ANTS はヨーロッパで開催される会議であり, SEAL はアジア・オーストラリアで開催されている。進化計算研究で飛躍的に発展している分野に群知能と進化型多目的最適化があるが, それらを対象とした国際会議として, それぞれ, ANTS と EMO がある。ANTS はもともと ACO (Ant Colony Optimisation) の会議であったが, 現在は, PSO (Particle Swarm Optimization) を含んだ群知能の会議となっている。

国内では, Goldberg の教科書 [Goldberg 89] に触発され, 90 年代から遺伝的アルゴリズムを中心とした進化計算研究が活性化していたが, 進化計算に特化した会議はあまり行われず, 既存の学会でセッションが組まれることが多かった。進化計算に特化した会議として, 2001 年から 2003 年の間, 同志社大学において, 情報処理学会の数値モデル化と問題解決 (MPS) 研究会 [MPS 01] が主催した進化的計算シンポジウムが開催された。2007 年からは, 本学会の前身である進化計算研究会が主催した進化計算シンポジウムが開催されている [EC 07]。論文誌についても同様であり, 進化計算のための論文誌はこれまで存在せず, 国内の進化計算研究の成果は各自が所属している学会誌に分散し, 各々の交流が乏しい状況であった。そのため, GECCO や CEC で見かけた優れた発表が国内研究者によるものであった場合, 改めて対応する日本語の成果を探すということが多々あった。本誌により優れた国内の研究成果が一元化されることを期待する。

表 2 論文誌のインパクトファクタ (Web of Science [WoS] による調査結果)

年	EVCO	TEVC
2004	3.206	3.600
2005	1.568	3.257
2006	1.325	3.770
2007	1.575	2.426
2008	3.000	3.736
2009	3.103	4.589

2.2 論文数の推移と内訳

表 3 に, 過去 10 年間の主要な 3 会議である GECCO, CEC, PPSN の投稿論文数と採択率の推移を示す。2003 年頃から投稿数が増加している様子が伺える。採択数について, GECCO は口頭発表の件数を表している。GECCO ではポスター発表のページ数が制限されており, Copyright 委譲も必要としていない。一方, CEC は論文提出時に, 自らポスター発表を希望することもでき, ページ数も口頭発表と同一であり予稿集上では区別していない。そのため, 採択数にはポスター発表の件数を含んだものとなっている。なお, PPSN はすべての発表がポスター発表である。GECCO は採択率が 50 % 以下になるようにしているが, この 5 年ほどは 45 % 付近で推移しているようである。また, 2007 年に初めて米国以外の国で開催してから, 隔年で米国を離れているようである (2011 年はアイルランド)。CEC は 2002 年と 2006 年から隔年で, ニューラルネットワークの国際会議である IJCNN とファジィの FUZZ-IEEE と共催で World Congress on Computational Intelligence (WCCI) として催される。WCCI は 2000 人強の参加者を集める盛大な会議であり, CEC の投稿数増加にも寄与していると考えられる。偶数年は, PPSN も開催されることもあり, GECCO の投稿数が減少する傾向がある。

図 2 は IEEE が出版した雑誌・予稿集を集めたデータベース IEEE Xplore [Xpl] にて, 進化計算に関連するキーワード (EC, EA, GA, ES, EP, GP, PSO, ACO) をフルスペルで入力し論文タイトルで検索した時の論文数の推移を表わす [電気学会 10]。つまり, EC なら Evolutionary Computation と検索し, 誤検出を防ぐため EC では検索していない。したがって, タイトルにこれらのキーワードの省略形が用いられていたなら, その論文はこの数には含まれていない。図 2 の論文数は控えめにカウントした件数といえる。また, PSO は Particle Swarm, ACO は Ant Colony で検索した。他の主要なキーワード (進化型多目的最適化: EMO, 分布推定アルゴリズム: EDA, 進化ハードウェア: EHW, メメティックアルゴリズム: MA) も検索したが, 過去 20 年間の総数が 100 件以下であったので, 省いている。これは, 呼び方が上記だけでなく他にも存在していることに起因している。図 2 で, 論文は IEEE の EC に関する雑誌 (TEVC)・予稿集 (ICEC, CEC) と, IEEE が発行している他の雑誌・予稿集に分けてプ

表3 GECCO, CEC, PPSN の投稿論文数と採択率の推移 (過去 10 年)

年	GECCO				CEC				PPSN			
	投稿数	採択数	採択率	開催地	投稿数	採択数	採択率	開催地	投稿数	採択数	採択率	開催地
2001	352	170	48.3	San Francisco, USA	252	174	68.2	Seoul, Korea				
2002	322	160	49.7	New York, USA	372	264	71.0	Hawaii, USA	181	90	49.7	Granada, Spain
2003	417	194	46.5	Chicago, USA	545	383	70.3	Canberra, Australia				
2004	460	230	50.0	Seattle, USA	460	328	71.3	Portland, USA	358	119	33.2	Birmingham, UK
2005	549	253	46.1	Washington DC, USA	660	379	57.4	Edinburgh, UK				
2006	446	205	46.0	Seattle, USA	792	451	56.9	Vancouver, Canada	206	114	55.3	Reykjavik, Iceland
2007	577	266	46.1	London, UK	1115	653	58.6	Singapore				
2008	451	199	44.1	Atlanta, USA	867	604	69.7	Hong Kong	255	106	41.6	Dortmund, Germany
2009	531	220	41.4	Montreal, Canada	723	448	62.0	Trondheim, Norway				
2010	373	169	45.3	Portland, USA	1027	622	60.6	Barcelona, Spain	232	128	55.2	Krakow, Poland

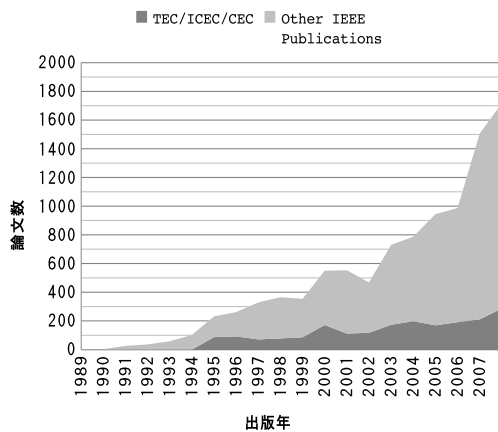


図2 進化計算関連の論文数 (IEEE Xplore による調査結果 [電気学会 10] より引用)

ロットしている。近年、論文数が著しく増大していることが判る。

図3は図2でキーワード占有率の推移を示している。これより、近年、群知能に関する研究発表が増大していることが分かる。また、論文のタイトルとしては、10年ほど前は Genetic Algorithm を入れた論文が多かったが、Evolutionary Algorithm という呼び名が論文タイトルに定着しつつあることも読み取れる。従来の GA ではないが進化の枠組みを使った手法について論文を書くとき、

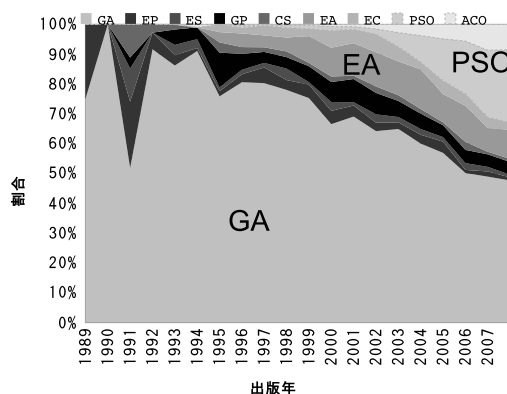


図3 キーワードによる内訳 (IEEE Xplore による調査結果 [電気学会 10] より引用)

Evolutionary Computation という領域全体を表わす名前を使うことも考えられるが、論文で使うにはその指し示す領域が大きすぎるということが要因かもしれない。

群知能と EMO は、現在、最もアクティブな研究領域であるが、EMO は図3で検索漏れしている。CEC2010 に投稿された 1000 件ほどの論文では、論文タイトルに Multi-Objective や Particle Swarm といった用語が含まれているものを数え上げると、群知能と EMO のそれぞれで 130 件ほどの論文があった。論文タイトルにこれらの用語が含まれていないが、EMO や PSO に関連している論文を考慮すると、それぞれの分野でおよそ 200 件ほどの論文が投稿されていた。

2.3 国内で引用の多かった論文

表4に CiNii(サイニィ) [Cin] で「遺伝」、または「進化」をキーワードとして検索したときに被引用回数が多かった出版物を挙げる。これらの多くは 90 年代に出版され、また、国内の進化計算研究に大きな影響を与えている。応用についても、[北野 93] に載せられている事例や表4下段に示されているように、進化計算、特に、遺伝的アルゴリズムの典型的な応用例が 90 年代前半に行われており、Goldberg のテキストと併せて進化計算研究の裾野を広げることに貢献している。

国内の進化計算研究に多大な影響を与えた論文として、世代交代モデル MGG を提案した [佐藤 97] を挙げるができる。被引用数の多さから伺えるように、実数値を対象とした国内の多くの研究が MGG モデルを用いている。また、[山村 92] では、遺伝的アルゴリズムにおいて問題の符号化法について、「完備性」、「非冗長性」、「健全性」、「形質遺伝性」という性質を導入し、遺伝的アルゴリズムの適用指針を与えた。

3. 進化計算研究の進展

3.1 関数最適化

70 年代の De Jong の博士論文 [De Jong 75] の頃からすでに関数最適化は進化計算研究の研究対象であり、今もなお、研究が推し進められている。これは、関数最適化が計算機による問題解決の一般的な枠組みを提供して

表 4 CiNii(サイニイ)[Cin] で「遺伝」「進化」での検索したときの被引用回数上位出版物(上段:テキスト;中断:手法に関する論文;下段:応用に関する論文)

筆者	著書名または論文のテーマ	引用
北野 編	遺伝的アルゴリズム	[北野 93]
坂和・田中	遺伝的アルゴリズム	[坂和 95]
西川・玉置	スケジューリング	[西川 91]
北野	遺伝的アルゴリズムの解説	[北野 92]
山村・小野・小林	コード化と交叉	[山村 92]
玉置・森・荒木	多目的最適化	[玉置 95]
佐藤・小野・小林	世代交代モデル	[佐藤 97]
森・築山・福田	免疫アルゴリズム	[森 97]
高木・畝見・寺野	対話型進化計算	[高木 98]
平澤・大久保・片桐・胡・村田	Genetic Network Programming	[平澤 01]
長尾・安居院・長橋	画像処理	[長尾 93]
山中・石田	地盤の震動特性解析	[山中 95]
前川・玉置・喜多・西川	TSP への応用	[前川 95]
池田	カオス常微分システム推定	[池田 02]
陳・時永	人工市場分析	[陳 03]

おり汎用性が高いこと,そして,勾配法が必要とする微分可能性といった性質を満足しない関数でも進化計算により解決可能であることによる.近年,CECでは,関数最適化に関するコンペティションが開かれている.制約付きの関数であったり,多目的な関数であったり,コンペティションの対象は変化している.2006年の単目的制約付き関数最適化のコンペティションでは,高濱の ϵ DE [Takahama 06] が優勝している.このコンペティションでは,後述する群知能に分類される PSO や DE を用いた研究が増大している.

また,CMA-ES [Hansen 03] や REX^{star} [小林 09] のように,平均ベクトルをシフトさせ積極的に有望領域を探索しようという試みがなされている.秋本らは,切取り選択を行う実数値 EDA と CMA-ES を理論的に比較し,一定の傾きを有する単純な適応度景観においても前者が停留してしまうことを理論的に示している [秋本 10].

3.2 組合せ最適化

組合せ最適化問題も進化計算の主要な研究領域である.大別すると永田らの巡回セールスマン問題のための EAX [永田 99] に代表されるように,交叉や突然変異にヒューリスティクスを埋め込む方法と,局所探索法を進化計算に組み込んでメタヒューリスティックアルゴリズムを構成する方法がある [片山 08].いずれにしても,問題固有の知識を埋め込んだ方法を活用しないと進化計算が機能しないことが知られている.そのため,様々な問題クラスが定式化されているオペレーションズ・リサーチの分野では,それぞれの問題クラスに応じたメタヒューリスティックアルゴリズムが開発されている [Gen 08].

問題クラスによってはインスタンスによって有用なヒューリスティクスが異なる,または,探索の序盤と終盤で用いるべきヒューリスティクスが異なる場合がある.近年「ヒューリスティクスを選択するヒューリスティクス」を表すハイパーヒューリスティクスの研究が行われている [Burke 09].現在では「ヒューリスティクスのパラ

メータをチューニングする」研究や「ヒューリスティクスを自動生成する」研究も包含した用語となっている.福永は SAT を対象として既知のヒューリスティクスと同等の性能を示す新しいヒューリスティクスを遺伝的プログラミングを用いて生成した [Fukunaga 08].

3.3 進化型多目的最適化

NSGA-II [Deb 02] や SPEA2 [Zitzler 01] を契機として,進化型多目的最適化 (Evolutionary Multi-Objective Optimization: EMO) の研究は,先述の通り独自の会議が開催されるなど,非常に活発になっている.NSGA-II や SPEA2 は,進化計算の集団が非劣解集合となることに力点を置いたアルゴリズムであり,解の精度という点では,改善の余地があった.解の精度の改善方法として,局所探索と進化型多目的最適化とのハイブリッド化に関する研究が 1996 年から盛んに行われている [Ishibuchi 96].また,石淵らは交叉個体の選択を調整することで大域的探索と局所探索のバランスを取ることでより良質な非劣解集合を得られることを提案している [Ishibuchi 04].

また,目的関数の個数が増大するにつれて,非劣解の個数が増大し NSGA-II や SPEA2 の方法が機能しないことが知られている [Ishibuchi 08a, Ishibuchi 08b].この対処法として IBEA に代表されるように Hypervolume などの指標に基づいて進化を行う方法 [Zitzler 04, Wagner 07],優劣関係を緩和して常に選択圧がかかるようにする方法 [Sato 09],チェビシェフ関数などのスカラー化関数を用いて様々な方向へ個体を進化させる用いる方法などがある [Ishibuchi 10].

近年,ニューラルネットワークやファジィシステム,遺伝的プログラミングへの応用を含めて,機械学習や知識獲得に関連した幅広い分野への進化型多目的最適化の応用が盛んである [Jin 06, Ishibuchi 07, Ghosh 08].これらの分野では,システムの複雑性と精度, False positive と False negative, Sensitivity と Specificity, Confidence と Support など,競合する目的の間でのトレードオフを取り扱う有望な手法として進化型多目的最適化が用いられている.さらに,個々のユーザーの嗜好を別々の目的と考えた超多目的最適化状況での特徴選択なども行われている [Reynolds 10].

3.4 対話型進化計算

対話型進化計算は解の評価に人間が介入する進化計算を指す.古くは Biomorph [Dawkins 86] に始まり,畝見の SBART に代表されるような芸術分野 [Unemi 99] や,さまざまな設計問題に適用されている [Takagi 01].

補聴器や人工内耳の研究では,得られた解を解析することにより,従来の聴覚心理・生理では判っていなかった,新たな知見が得られている [大崎 99, Legrand 07].また,統合失調者の心のダイナミックレンジを計測に対話型進化計算を用いた研究もなされている [Takagi 04].こ

れまでにカウンセリングやアートセラピーなどで専門家によってなされてきたことを対話型進化計算を用いることによりシステムティックに実現できることになる。

また、対話型進化計算と進化型多目的最適化の融合も興味深い分野である。一つのアプローチとしては非劣解集合として得られた解を選別するときに対話型進化計算を用いることが考えられる。もう一つのアプローチとしては、進化型多目的最適化の探索途中に非劣解集合を提示し、探索してほしい方向をユーザに指し示してもらう方法である [Yamamoto 10]。この方法は、絞込みによる探索の効率化が期待できる。

3.5 並列環境における進化計算

進化計算は多数の解を保持しつつ探索を行う並列性を内包したアルゴリズムであるので、並列環境との親和性が高く古くから研究がなされている。2000年代に入り、PC クラスタが安価で高性能になったことを背景に、PC クラスタに適した実装モデルの研究が推し進められてきた。小野らはグリッド環境のための MGG モデルを提案し、NMR 蛋白質立体構造決定問題において、1CPU なら 200 日ほどかかっていた計算を 2 時間強で終了できることを示した [小野 05]。論理モデルに関する研究として、廣安・三木らのグループが様々な分散遺伝的アルゴリズムを提案しており、包括的に研究が推し進められている [廣安 02a, 廣安 02b]。

近年、高い並列性と計算能力を有する GPGPU が注目されている。筒井らは、既存の進化アルゴリズムを対象として GPGPU のための実装モデルを提案している [筒井 10]。また、GPGPU を用いることで、個体群サイズを数万から百万程度に設定した多目的最適化に関する研究も行われている [Sharma 10]。GPGPU 自体が発展途上であり、バージョン毎にアーキテクチャも変わる状況にあるが、GPGPU の性能を十分に引き出す論理モデルの構築が期待される。

3.6 群知能

群知能とは、ネオダーウィニズムではなく、虫や動物といった生物の社会的振る舞いに着目したアルゴリズムの総称である。群知能は、対話型進化計算と同様に、独自の国際会議を開催し、GECCO や CEC でも多くの論文を集めている分野である。

Particle Swarm Optimization (PSO) は、集団の最良解を表す g_{best} 、各個体における最良解を表す p_{best} を用いて、解の移動方向を決定する。このとき、 g_{best} に重点をおいて探索することにより、Exploitation 重視の探索を行うことができる [相吉 07]。PSO は多様化 (exploration) と集中化 (exploitation) のバランスを取りやすく、実装が容易で性能も良好なので、広く用いられている。

アントコロニー最適化 (Ant Colony Optimization: ACO) は、蟻の社会的行動を模倣した探索アルゴリズムで、フェ

ロモンを介して協調して探索するアルゴリズムである。ACO では、TSP などの組合せ最適化問題に適用される。91 年にオリジナルのアルゴリズム [Colomni 91] が発表されてから、今日まで様々な改良型アルゴリズムが提案されている。筒井の cAS では、良好な個体の部分解を取り込み、残りの部分については従来のフェロモン濃度により解生成を行う [Tsutsui 06]。取り込む部分解の量を調整することにより、多様化と集中化のバランスを取ることができる。

3.7 確率モデルを用いた進化計算

ビルディングブロック仮説が示唆しているように、遺伝的アルゴリズムは定義長が短く適応度が高いスキーマが生き残り、探索に寄与する [Goldberg 89]。このため、もし対象問題について、遺伝子間の依存性が判っていれば、そのような遺伝子を近くに配置するような符号化を用いればよい。このためリンケージ同定を行うアルゴリズムの研究がなされてきた [Chen 07, Munetomo 02]。

分布推定アルゴリズム (Estimation of Distribution Algorithms: EDA) とも呼ばれる確率モデルを用いた進化計算 [半田 07] では、依存関係がある遺伝子の分布を条件付確率や同時確率で表現し、それらの積で集団の確率分布を推定する進化計算である。辻らはリンケージ同定アルゴリズムの知見を拡張した D^5 (Dependency Detection for Distribution Derived from fitness Differences) と呼ばれる分布推定アルゴリズムを提案した [Tsuji 06]。最適化問題を対象とした離散的な確率モデルを有する分布推定アルゴリズムは出尽くした感があり、木構造表現への拡張 [柳井 05, Hasegawa 08] や、強化学習問題へ対象問題を拡張する試み [Handa 09] がなされている。

3.8 応用に関する研究

工学的設計問題として、レンズなどの形状設計は 90 年代後半からなされてきた [Ono 00]。近年では、計算資源の増大に伴い、飛行機やエンジンの設計といった、流体などのシミュレータを併用した形状設計が行われている [大林 03, 梶 08, 渡邊 09, 下山 09]。また、ネットワークトポロジの設計やロジスティックスにおける諸問題について OR で行われている定式化をもとに、進化計算を近似解法として用いられている [玄 10]。画像処理では、既知のプリミティブなフィルタを組み合わせる新しいフィルタを設計したり、その応用として分類問題に適用がなされている [白川 07, 白川 10]。

進化型ハードウェア [Higuchi 06] の分野も主要な応用分野である。デジタル回路では、進化の枠組みと FPGA のようなプログラマブル論理回路を用いて、外部環境の変化に耐性を持ったり、セルフチューニング可能な回路の実現が試みられている。また、[Koza 99] に代表されるように、遺伝的プログラミングを用いて、“新しい” アナログ回路の合成も幅広く行われている。

エージェントやロボットの制御問題では, NEAT を始めとする NeuroEvolution の研究が盛んである [Stanley 02]. 大倉らは NEAT を拡張した MBEANN を提案しており, ニューラルネットワークの構造変化に中立的な突然変異を用い, 構造変化時に起こりうる悪影響を防いだ機構を提案している [大倉 06]. また, ヒューマノイドの動作のように, 多自由度で一定の時間経過を伴う行動パターンを獲得するために, GP を用いることがある [Kamio 05].

近年, 制御問題のテストベッドとして, ゲームが用いられることが多くなってきた. サッカーゲーム [Nakashima 06, Sato 06] のようなスポーツゲームだけでなく, パックマン [Lucas 06] やスーパーマリオブラザーズ [Togelius 09] などの昔のアクションゲームも対象となっている. 単に目標に向かって制御をするだけでなく, 戦略と呼ばれる中期的な行動プランニングを動的に構成する必要があるため, 興味深い分野であると言える.

その他の分野として, バイオインフォマティクス [Gary 04] の分野では, ゲノム配列決定や蛋白質立体構造決定 [小野 05] に用いられている. 蛋白質の 3 次元構造推定の場合, 一旦, 解が生成されると, その評価を行うことが容易であるが, 確立された解の生成方法が存在しない問題である. このような場合, 進化計算はその威力を発揮できる. また, 金融工学では, トレーダエージェントの構築や [長尾 08, Hirabayashi 09] やポートフォリオの最適化 [折登 09] に進化計算が利用されている.

エージェントベースシミュレーションでは, よくエージェントの設計に進化計算を用いることが多いが, Yang らはエージェントベースシミュレーションのパラメータを進化計算により求めている [Yang 09]. 事実として分かっている現象に合致するパラメータを導出することにより, その現象の背景やメカニズムを伺い知ることができる」と主張している.

4. む す び

本論文では, 主要論文誌のインパクトファクタや国際会議の投稿数・採択率, IEEE Xplore における論文数推移から, 近年, 進化計算研究が非常に活発で, その重要性がますます高まっていることを紹介した. CiNii による調査に基づいて被引用数の高い国内の論文を示し, 90 年代から理論・応用の両方において現在の進化計算研究の基礎となる研究があったことを述べた.

また, 進化型多目的最適化や群知能をはじめ, 進化計算の主要な研究分野の動向について触れた. ここでは, できるだけ多くの研究を偏りなく紹介しようと心がけたが, 筆者の知識の浅さもあり, State of the Art を完全に覆いつくせていない (例えば DE や AIS など). 本学会誌では, 各分野について招待論文や特集号が企画されると思うのでご期待いただきたい.

◇ 参 考 文 献 ◇

- [相吉 07] 相吉 英太郎, 安田 恵一郎: メタヒューリスティクスと応用, オーム社 (2007)
- [秋本 10] 秋本 洋平, 永田 裕一, 小野 功, 小林 重信: 実数値進化計算の極値収束性の挙動解析, 第 3 回進化計算フロンティア研究会資料集, pp. 73–80 (2010)
- [Burke 09] Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., and Qu, R.: A Survey of Hyper-heuristics, Technical Report NOTTCS-TR-SUB-0906241418-2747, School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham (2009)
- [Chen 07] Chen, ping Y., Yu, T.-L., Sastry, K., and Goldberg, D. E.: A Survey of Linkage Learning Techniques in Genetic and Evolutionary Algorithms, Technical report, IlliGAL Report, No. 2007014 (2007)
- [Cin] CiNii-NII 論文情報ナビゲータ, <http://ci.nii.ac.jp>
- [CIS] IEEE Computational Intelligence Society, <http://www.ieee-cis.org>
- [Colomi 91] Colomi, A., Dorigo, M., and Maniezzod, V.: Distributed Optimization by Ant Colonies, in *Proc. of the First European Conference on Artificial Life*, No. 1, pp. 134–142 (1991)
- [Dawkins 86] Dawkins, R.: *The blind watchmaker*, Norton (1986)
- [De Jong 75] De Jong, K. A.: *Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, PhD dissertation, The University of Michigan, Computer and Communication Sciences Department (1975)
- [Deb 02] Deb, K. D., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197 (2002)
- [電気学会 10] 電気学会 進化技術応用調査専門委員会編: 進化技術ハンドブック, 近代科学社 (2010)
- [EC 07] 進化計算シンポジウム 2007–講演論文集, 進化計算研究会 (2007)
- [EVC] Evolutionary Computation, <http://www.mitpressjournals.org/loi/evco>
- [Fukunaga 08] Fukunaga, A. S.: Automated discovery of local search heuristics for satisfiability testing, *Evolutionary Computation*, Vol. 16, No. 1, pp. 31–61 (2008)
- [Gen 08] Gen, M., Cheng, R., and Lin, L.: *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach*, Springer Publishing Company, Incorporated (2008)
- [玄 10] 玄 光男, 川上 浩司, 辻村 泰寛, 半田 久志, 林 林, 岡本 東: 進化技術の基礎と情報通信・生産物流システムへの応用, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 130, No. 5, pp. 731–736 (2010)
- [Ghosh 08] Ghosh, A., Dehuri, S., and Ghosh, S. eds.: *Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Knowledge Discovery from Databases*, Springer (2008)
- [Goldberg 89] Goldberg, D. E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, MA (1989)
- [半田 07] 半田 久志: 確率モデルを用いた進化計算: 分布推定アルゴリズムに関する最近の話題, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, Vol. 51, No. 5, pp. 224–229 (2007)
- [Handa 09] Handa, H.: EDA-RL: estimation of distribution algorithms for reinforcement learning problems, in *GECCO '09: Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 405–412 (2009)
- [Hansen 03] Hansen, N., Muller, S. D., and Koumoutsakos, P.: Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES), *Evolutionary Computation*, Vol. 11, pp. 1–18 (2003)
- [Hasegawa 08] Hasegawa, Y. and Iba, H.: A Bayesian Network Approach for Program Generation, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 12, No. 6, pp. 750–764 (2008)
- [Higuchi 06] Higuchi, T., Liu, Y., and Yao, X. eds.: *Evolvable Hardware*, Springer (2006)
- [Hirabayashi 09] Hirabayashi, A., Aranha, C., and Iba, H.: Optimization of the trading rule in foreign exchange using genetic algorithm, in *GECCO '09: Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 1529–1536 (2009)

- [平澤 01] 平澤 宏太郎, 大久保 雅文, 片桐 広伸, 胡 敬炉, 村田 純一: 蟻の行動進化における Genetic Network Programming と Genetic Programming の性能比較, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 121, No. 6, pp. 1001–1009 (2001)
- [廣安 02a] 廣安 知之, 三木 光範, 上浦二郎: 実験計画法を用いた分散遺伝的アルゴリズムのパラメータ推定, 情報処理学会論文誌. 数理モデル化と応用, Vol. 43, No. SIG 10(TOM 7), pp. 199–217 (2002)
- [廣安 02b] 廣安 知之, 三木 光範, 佐野 正樹, 谷村 勇輔, 濱崎 雅弘: 2 個体分散遺伝的アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 11, pp. 990–995 (2002)
- [Gary 04] Fogel, G., David Corne 編, 伊庭 斉志 (監訳): ソフトコンピューティングとバイオインフォマティクス, 東京電機大学出版 (2004)
- [池田 02] 池田 欽一: 共進化 GP によるカオス常微分システムの推定, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-A, No. 4, pp. 424–433 (2002)
- [Ishibuchi 96] Ishibuchi, H. and Murata, T.: Multi-Objective Genetic Local Search Algorithm, in *Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 119–124 (1996)
- [Ishibuchi 04] Ishibuchi, H. and Shibata, Y.: Mating Scheme for Controlling the Diversity-Convergence Balance for Multiobjective Optimization, in *Proceedings of 2004 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 1259–1271 (2004)
- [Ishibuchi 07] Ishibuchi, H.: Multiobjective Genetic Fuzzy Systems: Review and Future Research Directions, in *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 1–6 (2007)
- [Ishibuchi 08a] Ishibuchi, H., Tsukamoto, N., Hitotsuyanagi, Y., and Nojima, Y.: Effectiveness of scalability improvement attempts on the performance of NSGA-II for many-objective problems, in *Proceedings of 2008 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 649–656 (2008)
- [Ishibuchi 08b] Ishibuchi, H., Tsukamoto, N., and Nojima, Y.: Evolutionary many-objective optimization: A short review, in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2419–2426 (2008)
- [Ishibuchi 10] Ishibuchi, H., Sakane, Y., Tsukamoto, N., and Nojima, Y.: Simultaneous use of different scalarizing functions in MOEA/D, in *Proceedings of 2010 Genetic and evolutionary computation conference*, pp. 519–526 (2010)
- [Jin 06] Jin, Y.: *Multi-Objective Machine Learning*, Springer-Verlag New York, Inc. (2006)
- [梶 08] 梶 洋隆, 喜多一: 適応度推定を用いた実験ベース進化的多目的最適化の加速, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 128-C, No. 3, pp. 388–398 (2008)
- [Kamio 05] Kamio, S. and Iba, H.: Adaptation Technique for Integrating Genetic Programming and Reinforcement Learning for Real Robots, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 9, No. 3, pp. 318–333 (2005)
- [片山 08] 片山 謙吾, 石淵 久生: Memetic アルゴリズム, 計測と制御, Vol. 47, No. 6, pp. 478–492 (2008)
- [北野 92] 北野 宏明: 遺伝的アルゴリズム, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 26–37 (1992)
- [北野 93] 北野 宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993)
- [小林 09] 小林 重信: 実数値 GA のフロンティア, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 147–162 (2009)
- [Koza 99] Koza, J., Bennett III, F., Andre, D., and Keane, M. eds.: *Genetic Programming III*, Morgan Kaufmann (1999)
- [Legrand 07] Legrand, P., Bourgeois-Republique, C., Péan, V., Harboun-Cohen, E., Levy-Vehel, J., Frachet, B., Lutton, E., and Collet, P.: Interactive Evolution for Cochlear Implants Fitting, *Genetic Programming and Evolvable Machines*, Vol. 8, No. 4, pp. 319–354 (2007)
- [Lucas 06] Lucas, S. M. and Kendall, G.: Evolutionary computation and games, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp. 10–18 (2006)
- [前川 95] 前川 景示, 玉置 久, 喜多一, 西川 [示章] 一: 遺伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 5, pp. 598–605 (1995)
- [森 97] 森 一之, 築山 誠, 福田 豊生: 免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 117, No. 5, pp. 593–598 (1997)
- [MPS 01] MPS シンポジウム論文集: 進化的計算シンポジウム 2001, 情報処理学会 (2001)
- [Munetomo 02] Munetomo, M.: Linkage Identification with Epistasis Measure Considering Monotonicity Conditions, in *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*, pp. 550–554 (2002)
- [長尾 93] 長尾 智晴, 安居院 猛, 長橋 宏: 遺伝的手法を用いた 2 値図形のパターンマッチング, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-2, No. 3, pp. 557–565 (1993)
- [長尾 08] 長尾 優, 森 直樹, 中島 義裕, 松本 啓之亮: デイトレードエージェントフレームワークを用いた遺伝的プログラミングによる投資戦略の進化, システム制御情報学会論文誌, Vol. 21, No. 12, pp. 400–407 (2008)
- [永田 99] 永田 裕一, 小林 重信: 巡回セールスマン問題に対する交叉: 枝組み立て交叉の提案と評価, 人工知能学会論文誌, Vol. 14, No. 5, pp. 848–859 (1999)
- [Nakashima 06] Nakashima, T. and Ishibuchi, H.: Computational Intelligence in RoboCup Soccer Simulation, in *Computational Intelligence: Principles and Practice*, pp. 217–236, IEEE Computational Intelligence Society (2006)
- [西川 91] 西川 [示章] 一, 玉置 久: ジョブショップ・スケジューリング問題に対する遺伝アルゴリズムの一構成法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 5, pp. 593–599 (1991)
- [大林 03] 大林 茂: 航空機の多目的最適設計, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 495–501 (2003)
- [大倉 06] 大倉 和博, 岩波 悟史: 進化型人工神経回路網の構造進化のための一手法 — 二重倒立振子問題への適用 —, システム制御情報学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 51–58 (2006)
- [大崎 99] 大崎 美穂: 進化的計算手法を用いた聴覚障害補償に関する研究, Technical report, 九州芸術工科大学博士論文 (1999)
- [Ono 00] Ono, I., Kobayashi, S., and Yoshida, K.: Optimal Lens Design by Real-Coded Genetic Algorithms Using UNDX, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, No. 2–4, pp. 483–497 (2000)
- [小野 05] 小野 功, 水口 尚亮, 中島 直敏, 小野 典彦, 中田 秀基, 松岡 聡, 関口 智嗣, 楯真一: Ninf-1/Ninf-G を用いた NMR 蛋白質立体構造決定のための遺伝アルゴリズムのグリッド化, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 46, No. ACS11, pp. 396–406 (2005)
- [折登 09] 折登 由希子, 山本 久志, 井ノ口 学, 杉崎 翔大: GA による動的なアセットで構成されたポートフォリオの最適化, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 129, No. 7, pp. 1348–1355 (2009)
- [陳 03] 陳 曉榮, 時永 祥三: 共進化 GP を用いたマルチエージェントシステムの構成とその人工市場分析への応用 (非線形問題), 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-A, No. 10, pp. 1038–1048 (2003)
- [Reynolds 10] Reynolds, A., Corne, D., and Chantler, M.: Feature selection for multi-purpose predictive models: A many-objective task, in *Parallel Problem Solving from Nature XI*, pp. 384–393 (2010)
- [坂和 95] 坂和 正敏, 田中 雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店 (1995)
- [佐藤 97] 佐藤 浩, 小野 功, 小林 重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 734–744 (1997)
- [Sato 06] Sato, Y., Akatsuka, Y., and Nishizono, T.: Reward allotment in an event-driven hybrid learning classifier system for online soccer games, in *GECCO '06: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 1753–1760 (2006)
- [Sato 09] Sato, H., Aguirre, H. E., and Tanaka, K.: Local Dominance MOEA Including Control of Dominance Area of Solutions on 0/1 Multiobjective Knapsack Problems, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 69–79 (2009)
- [Sharma 10] Sharma, D. and Collet, P.: GPGPU-compatible Archived Based Stochastic Ranking Evolutionary Algorithm (G-ASREA) for Multi-Objective Optimization, in *Parallel Problem Solving from Nature XI*, pp. 111–120 (2010)
- [下山 09] 下山 幸治, 鄭 信圭, 大林 茂: 応答曲面近似・可視化データマイニングを利用したロバスト設計最適化の実問題応用, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 13–24 (2009)
- [白川 07] 白川 真一, 荻野 慎太郎, 長尾 智晴: Genetic Image Network による画像変換の自動構築, 情報処理学会論文誌: 数理モデ

- ル化と応用 (TOM 19), Vol. 48, No. No.SIG 19, pp. 117–126 (2007)
- [白川 10] 白川 真一, 中山 史朗, 矢田 紀子, 長尾 智晴: Genetic Image Network に基づく画像分類アルゴリズムの自動構築, 人工知能学会論文誌, Vol. 25, No. 2, pp. 262–271 (2010)
- [SIG] ACM Special Interest Group on Genetic and Evolutionary Computation, <http://www.sigevo.org>
- [Stanley 02] Stanley, K. O. and Miikkulainen, R.: Evolving neural networks through augmenting topologies, *Evolutionary Computation*, Vol. 10, No. 2, pp. 99–127 (2002)
- [高木 98] 高木 英行, 畝見 達夫, 寺野 隆雄: 対話型進化計算法の研究動向, 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 692–703 (1998)
- [Takagi 01] Takagi, H.: Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 9, pp. 1275–1296 (2001)
- [Takagi 04] Takagi, H., Takahashi, T., and Aoki, K.: Applicability of Interactive Evolutionary Computation to Mental Health Measurement, in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2004)*, pp. 5714–5718 (2004), the Hague, the Netherlands
- [Takahama 06] Takahama, T. and Sakai, S.: Constrained Optimization by the ϵ Constrained Differential Evolution with Gradient-Based Mutation and Feasible Elites, in *Proceedings of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1–8 (2006)
- [玉置 95] 玉置 久, 森 正勝, 荒木 光彦: 遺伝アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 8, pp. 1185–1192 (1995)
- [TEV] IEEE Transactions on Evolutionary Computation, <http://www.ieee-cis.org/pubs/tec/>
- [Togelius 09] Togelius, J., Karakovskiy, S., Koutnik, J., and Schmidhuber, J.: Super Mario Evolution, in *Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pp. 156–161 (2009)
- [Tsuji 06] Tsuji, M., Munetomo, M., and Akama, K.: Linkage Identification by Fitness Difference Clustering, *Evolutionary Computation*, Vol. 14, No. 4, pp. 383–409 (2006)
- [Tsutsui 06] Tsutsui, S.: cAS: Ant Colony Optimization with Cunnings Ants, in *Proceedings of the 9th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN IX)*, pp. 162–171 (2006)
- [筒井 10] 筒井 茂義, 藤本 典幸: GPU 計算を用いた並列進化計算による二次割当て問題の一解法とその解析, 人工知能学会第 3 回進化計算フロンティア研究会 講演論文集, pp. 90–100 (2010)
- [Unemi 99] Unemi, T.: SBART2.4: Breeding 2D CG Images and Movies, and Creating a type of Collage, in *The Third International Conference on Knowledge-based Intelligent Information Engineering Systems*, pp. 288–291 (1999)
- [Wagner 07] Wagner, T., Beume, N., and Naujoks, B.: Pareto-, aggregation-, and indicator-based methods in many-objective optimization, in *EMO'07: Proceedings of the 4th international conference on Evolutionary multi-criterion optimization*, pp. 742–756 (2007)
- [渡邊 09] 渡邊 真也, 湊 亮二郎: 多数非劣解集合からの設計支援手法の開発, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 1–12 (2009)
- [WoS] Web of Science, <http://isiknowledge.com/>
- [Xpl] IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org>
- [Yamamoto 10] Yamamoto, M., Yoshikawa, T., and Furuhashi, T.: Study on Effect of MOGA with Interactive Island Model using Visualization, in *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4196–4201 (2010)
- [山村 92] 山村 雅幸, 小野 貴久, 小林 重信: 形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 1049–1059 (1992)
- [山中 95] 山中 浩明, 石田 寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 468, pp. 9–17 (1995)
- [柳井 05] 柳井 孝介, 伊庭 斉志: 条件付確率に基づく分布推定アルゴリズムによるプログラム進化, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. SIG10, pp. 111–123 (2005)
- [Yang 09] Yang, C., Kurahashi, S., Kurahashi, K., Ono, I., and Terano, T.: Agent-Based Simulation on Women's Role in a Family Line on Civil Service Examination in Chinese History, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 12, No. 2, p. 5 (2009)
- [Zitzler 01] Zitzler, E., Laumanns, M., and Thiele, L.: SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Technical Re-

port 103 (2001)

[Zitzler 04] Zitzler, E. and Künzli, S.: Indicator-Based Selection in Multiobjective Search, in *Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VIII)*, pp. 832–842 (2004)

〔担当委員: 小林 重信〕

2010 年 9 月 22 日 受理

著者紹介



石渕 久生 (一般会員)

1987 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年大阪府立大学工学部助手, 1993 年同講師, 1994 年同助教授, 1999 年同教授, 2000 年同大学大学院工学研究科教授となり, 現在に至る。博士 (工学)。GECCO 2004 Best Paper Award, HIS-NCEI 2006 Best Paper Award, FUZZ-IEEE 2009 Best Paper Award, 第 4 回日本学術振興会賞などを受賞。進化型多目的最適化, ファジィ識別システム, 進化ゲーム等に関する研究に従事。現在, 進化計算学会理事, IEEE Computational Intelligence Society Vice President。また, IEEE Trans. on Evolutionary Computation, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, IEEE Trans. on SMC Part B, IEEE CI Magazine の Associate Editor, Soft Computing Journal の Area Editor。国際会議では, CEC 2010 の Program Chair, FUZZ-IEEE 2011 の Program Co-Chair および ICMLA 2011 の General Chair。



半田 久志 (一般会員)

1996 年大阪教育大学大学院修士課程修了, 1998 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程退学, 同年より岡山大学工学部情報工学科助手, 2005 年より同大学自然科学研究科助手。その間, 英国 Birmingham 大学 Visiting Research Fellow (2004–2005), 同大学 Honorary Research Fellow (2006–2011)。2009 GECCO Best Paper Award, 2009 年度人工知能学会研究会優秀賞 (進化計算フロンティア研究会) を受賞。進化計算シンポジウム 2008 のプログラム委員長, 進化計算学会論文誌編集委員, IEEE CIS の Evolutionary Computation Technical Committee の委員, GECCO 1999–2010, CEC 2005–2010, PPSN IX–XI 等のプログラム委員等を務める。進化計算・強化学習の研究に従事。博士 (情報学)。