

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15016

研究課題名(和文) ネットワークシステム上の分散型空間フィルタリング

研究課題名(英文) Distributed spatial filtering over networked systems

研究代表者

泉 晋作 (Izumi, Shinsaku)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：10757967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ネットワークシステムに対する「分散型空間フィルタリング」の基礎理論の構築に取り組んだ。分散型空間フィルタリングとは、個々のサブシステムに信号値が与えられたとき、各サブシステムが近傍のものと情報を交換し、所望の空間周波数特性をもつ信号値を得るというものである。本研究では、合意制御に基づくフィルタリングアルゴリズムを提案し、これによって実現可能なすべての空間フィルタを明らかにした。そして、センサネットワークの観測データに対するノイズ除去の実験を行い、提案法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御工学の分野では、これまで時系列信号に対するフィルタリングが主に考えられており、信号値がネットワーク上に空間的に分散している信号については検討されていなかった。本研究の成果により、そのような信号のフィルタリングをネットワークシステム上で分散的に行うことが可能となる。加えて、提案法には、時系列信号に対するフィルタリングとは異なり、対象とする信号の空間的な性質を活用できる、個々のサブシステムが取得した短時間のデータだけでフィルタリングができるといった利点がある。このような技術は、たとえば、センサネットワークによる環境モニタリングの高速化・高効率化につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study considered distributed spatial filtering over networked systems, i.e., obtaining signal values with a desired spatial frequency characteristic from those given for nodes by a distributed algorithm. We proposed a filtering algorithm based on a consensus algorithm and revealed all the achievable filter characteristics. The performance of the proposed algorithm was demonstrated through denoising experiments for a real sensor network.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワークシステム 分散アルゴリズム 空間フィルタリング センサネットワーク グラフ信号処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

複数のサブシステムがネットワークで結ばれたものは「ネットワークシステム」とよばれ、制御工学の分野では注目の研究対象となっている。その理由として、社会的ニーズの高い技術への応用が挙げられる。たとえば、センサネットワーク（多数のセンサを無線通信で接続したもの）は環境のモニタリングや遠隔医療・介護などのために必要とされているが、個々のセンサをサブシステムと考えれば、これはネットワークシステムといえる。

このネットワークシステムに対し、本研究では「分散型空間フィルタリング」を考える。これは、個々のサブシステム（以下、ノードとよぶ）に信号値が与えられたとき、各ノードが近傍のものと情報を交換し、所望の空間周波数特性をもつ信号値を得るというものである。例として、ローパスフィルタ処理の様子を図1に示す。 x_i がノード i ($i = 1, 2, \dots, 8$) に与えられた信号値を、 z_i がフィルタ処理後の信号値を表し、インデックス i が近いノードが空間的に近い位置にあるものとする。 $z_1 \sim z_8$ からなるフィルタ処理後の信号は元の信号よりも空間周波数が低い（空間的に近いノード間の信号値の差が小さい）ことが確認できる。このようなフィルタリングには、分散型の処理方式であるため大規模なシステムに適する、対象とする信号の空間的な性質を活用できるといった利点がある。しかし、制御工学の分野では、これまで時系列信号に対するフィルタリングが主に考えられており、信号値がネットワーク上に空間的に分散している信号については検討されていなかった。

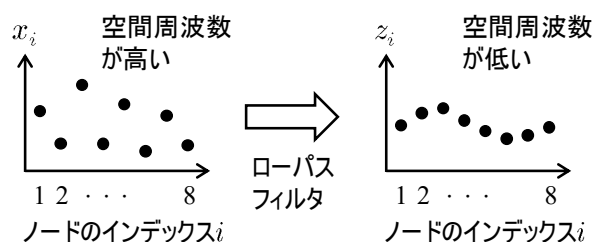


図1 空間フィルタリングの例

2. 研究の目的

そこで本研究では、ネットワークシステムに対する分散型空間フィルタリングの基礎理論の構築を目的とする。とくに、グラフ信号とよばれる、グラフの各頂点に値をもつ信号に着目し、グラフ信号のフィルタリングと同様の処理を行うような各ノードの設計法を開発する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、つぎの方法で研究を進めた。

(1) 分散型空間フィルタリングの実現可能性の検討

グラフ信号のフィルタリングは集中型の処理方式で行われることを前提としているため、これをネットワークシステム上で分散的に実行できるとは限らない。そこで、ある分散型アルゴリズムを用いて、グラフ信号のフィルタリングがネットワークシステム上で実現できるかを検討する。具体的には、分散型アルゴリズムとして、近傍のノードの状態量の線形結合を用いるものを考え、これを各ノードに適用したネットワークシステムを考える。そして、このシステムの振舞いとグラフ信号のフィルタリングを比較し、同様の操作が行われているかを調べる。もし同様の操作が行われていれば、考えた分散型アルゴリズムによって、グラフ信号に対するあるフィルタが実現されることになる。

(2) フィルタリングアルゴリズムの開発と解析

(1)で検討した分散型アルゴリズムに設計パラメータを導入したものを考え、それを各ノードに適用したネットワークシステムを考える。そして、(1)と同様に、このシステムの振舞いとグラフ信号のフィルタリングを比較し、考えた分散型アルゴリズムによって実現可能なフィルタをある関数として表現する。その後、得られたフィルタ関数と設計パラメータの関係を明らかにし、与えられた空間フィルタを実現する設計パラメータの決定法を与える。

(3) 計算機シミュレーションおよび実機実験による検証

得られた結果の有効性を計算機シミュレーションと実機実験により検証する。計算機シミュレーションでは、開発した分散型アルゴリズムによるフィルタリングを行い、グラフ信号のフィルタリングを行った場合と同様の結果が得られるかを確認する。実機実験では、実験用のセンサネットワークを構築し、その観測データのノイズ除去に分散型空間フィルタリングを応用して、

実システムに対する有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究の主要な成果は以下のとおりである。

(1) 合意制御とグラフ信号のフィルタリングの関係の解明

ネットワークシステムの合意制御（全ノードの状態量を一致させる制御）がグラフ信号のローパスフィルタ処理に対応していることを示した。これは、合意制御によって、あるクラスの空間フィルタが分散的に実現できることを意味する。

(2) フィルタリングアルゴリズムの開発と解析

(1)の成果を踏まえて、合意制御に基づくフィルタリングアルゴリズムを開発した。そして、開発したアルゴリズムによって実現可能なすべての空間フィルタを明らかにした。具体的には、実現可能なフィルタは、フィルタ関数がある多項式で記述されるものでかつそのみであることを示した。さらに、この結果から、フィルタ関数が与えられたとき、対応するフィルタを実現するアルゴリズムのパラメータの決定法を示した。これにより、フィルタ関数を指定するだけで、適切なパラメータの値が求まる。

(3) センサネットワークを用いた実験検証

実験装置として、温湿度センサ、マイコン、無線通信モジュールからなる、図2のセンサノードを製作した。このセンサノード7個を7×13mの部屋に図3のように配置し、センサネットワークを構築した。ここで、図中の番号がセンサノード1～7の位置を表している。そして、センサノードが置かれた場所の室温を対応するノードで測定し、測定データに含まれるノイズを分散型空間フィルタリングによって除去した。

図4がノイズ除去の実験結果である。ここで、 y_i がセンサノード i ($i = 1, 2, \dots, 7$)の場所の室温、四角がセンサノードによる測定値、三角が測定値に分散型空間フィルタリングを適用した結果を示している。また、丸はハンディ型の高精度温湿度計による測定値であり、これを推定すべき真値とする。図4を見ると、分散型空間フィルタリングによってノイズが除去され、真値に近い値が得られていることがわかる。

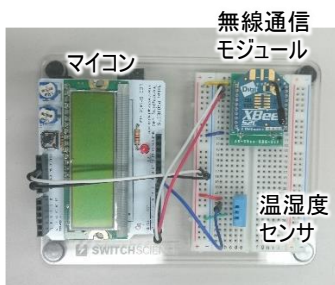


図2 製作したセンサノード



図3 センサノードの配置

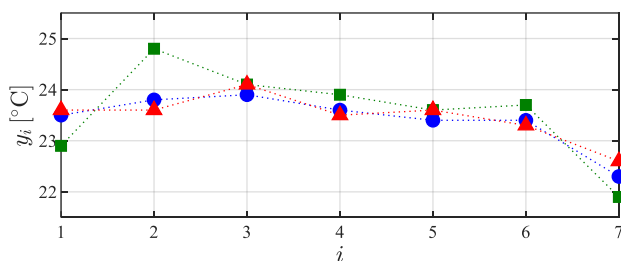


図4 ノイズ除去の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 S. Izumi, S. Azuma, and T. Sugie	4. 巻 8
2. 論文標題 Multi-Robot Control Inspired by Bacterial Chemotaxis: Coverage and Rendezvous via Networking of Chemotaxis Controllers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 124172-124184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.3006096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Izumi, R. Katayama, X. Xin, and T. Yamasaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Distributed Spatial Filtering over Networked Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 617-622
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCSYS.2020.3004728	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Izumi and S. Azuma	4. 巻 38
2. 論文標題 Chemotaxis-Inspired Control for Multi-Agent Coordination: Formation Control by Two Types of Chemotaxis Controllers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 303-324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00354-020-00093-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Izumi, S. Azuma, and T. Sugie	4. 巻 8
2. 論文標題 Analysis and Design of Multi-Agent Systems in Spatial Frequency Domain: Application to Distributed Spatial Filtering in Sensor Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 34909-34918
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.2974243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Izumi, K. Shinagawa, X. Xin, and T. Yamasaki	4. 巻 6
2. 論文標題 Formation Control of Four-Legged Robots using Discrete-Valued Inputs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1088-1093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3088683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Izumi	4. 巻 40
2. 論文標題 Performance Analysis of Chemotaxis-Inspired Stochastic Controllers for Multi-Agent Coverage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 871-887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-022-00189-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Izumi and X. Xin	4. 巻 -
2. 論文標題 Leader-Follower Formation Control of Four-Legged Robots with Discrete-Valued Inputs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Dynamics and Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40435-023-01120-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 S. Izumi
2. 発表標題 Performance Analysis of Chemotaxis-Inspired Coverage Controllers for Multi-Agent Systems
3. 学会等名 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 泉晋作, 片山亮佑, 忻欣, 山崎大河
2. 発表標題 センサネットワークにおける分散型空間フィルタリング
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 望月優希, 泉晋作, 忻欣, 山崎大河
2. 発表標題 時変ネットワークにおける四足歩行ロボットのフォーメーション制御
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関