

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820162

研究課題名(和文) グローカル双対性とその応用

研究課題名(英文) Glocal Duality and Its Applications

研究代表者

岩谷 靖 (Iwatani, Yasushi)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10400300

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)： 双対性はシステム工学の中で重要な概念であり，制御理論における観測と制御の双対性や，最適化理論における主問題と双対問題の対応として現れる。本研究課題は，既にある「ローカルな計測・予測・制御によりグローバルな性能の向上を狙うグローバル制御の概念」と研究代表者が提案している「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合した計測手法」を双対性の観点から考察し，対応する系の数理的構造を明らかにすることを目的とした。

当初の目的である双対性を明らかにすることはできなかったが，研究代表者が提案している計測手法から，グローバル制御則の一つの表現を導出した。また提案制御則の有効性を実験により確認した。

研究成果の概要(英文)： Duality is one of important concepts in system sciences, and, for example, we can see the duality between control and estimation in control engineering and the dual problem in optimization. The objective of this research is to investigate the duality between “the concept of glocal control that means the global purpose is achieved by local actions of sensing and control” and “visual tracking by a feedback combination of global optimization and local optimization”, and to see the mathematical model of the duality between them.

The duality between them could not be found, however a glocal control method based on the visual tracing by a feedback combination of global optimization and local optimization. In addition, the effectiveness of the proposed controller was demonstrated by experimental systems.

研究分野：制御工学

キーワード：計測工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 双対性は、システム工学の基盤を形作る概念の一つである。制御理論においては、観測と制御が双対の関係にある。制御理論における双対性は、制御問題の数理的構造を明らかにすることで、制御系設計問題および状態推定問題の解決に役立ってきた。最適化理論においては、主問題に対して、双対問題が定義される。最適化理論における双対性は、単なる最適化問題の数理的構造の解明のみならず、主双対内点法に代表される高速アルゴリズムの構築にも役立ってきた。

(2) 現在、制御系の大規模化・複雑化は増加する一方であり、また、もとより大規模・複雑な自然システムや社会システムの解析手法・制御系設計手法の重要性もますます増している。これらの要求に制御の観点から答えるために提案された概念の一つが、グローバル制御の概念である。グローバル制御の概念では、まず、大規模・複雑系を、多数の局所動的システムが、異なる階層から構成される相互作用を通じて、互いに影響を与え合う動的システムとしてモデル化する(図1)。そして、各階層における各局所システム内のローカルな計測・推定・制御により、システム全体のグローバルな振る舞いを望みの通りに制御することを目的とする。

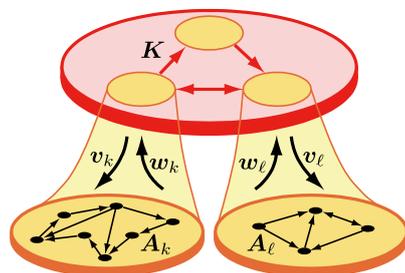


図1：局所システムの階層構造 (S. Hara, SICE Annual Conf. 2013 より)

(3) 一方で、これまでに研究代表者が提案している大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合したビジュアルトラッキング手法は、二つの階層から構成される(図2)。下層は、指定された一つの特徴点を追跡する層であり、8次元実数空間における勾配法に基づく局所的最適化が行われる。上層は、局所的最適化を行うための初期値を補正する層であり、有界な2次元整数空間における全探索による大域的最適化が行われる。この上層の働きが、下層の最適化が局所最適解におちいることを防ぐなど、勾配法と全探索のデメリットが互いに打ち消されるように、お互いが補強しあう。これにより、従来よりロバストなビジュアルトラッキングが達成された。

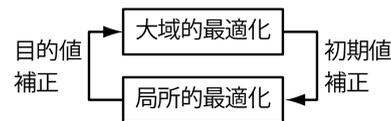


図2：大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合したビジュアルトラッキング (Y. Iwatani, Advanced Robotics, 2013 より)

(4) グローカル制御の概念では、システム全体のグローバルな振る舞いを直接的に制御するのではなく、各局所システム内のローカルな計測・推定・制御により、システム全体のグローバルな振る舞いを望みの通りに制御することを目的とする。一方、研究代表者の提案しているビジュアルトラッキング手法においても、全体のシステムを最適化する構造は存在せず、各局所システムが、その局所システム内での最適化により全体のトラッキング性能を向上させている。すなわち、グローバル制御の概念と、「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合した計測手法」は類推(アナロジー)の関係性を有する。

(5) もし、上記グローバル制御の概念と、研究代表者の提案している「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合した計測手法」のあいだに、双対性に関わる何らかの数理的構造を明らかにすることができれば、グローバル制御の解析・設計に関して、その数理的基盤を確立できることが期待される。

2. 研究の目的

本研究課題では、グローバル制御の概念に、計測と制御の両面から双対性の概念を導入することで、グローバル制御系の数理的構造を明らかにすることを目的とする。これにより、グローバル制御系設計手法の基盤を確立することを主目的とした。

本研究の主たる目的は、制御の観点から、グローバル制御の概念における新たな制御系設計手法を提案することや、新たなアプリケーションを提案することにあるわけではない。しかし次項の「研究の方法(2)」で述べるように、主目的の遂行が当初の予定通りでない場合には、研究代表者の提案するビジュアルトラッキング手法を基としたグローバル制御系を設計することで、上述の主目的の解決を図ることも検討する。

3. 研究の方法

(1) 理論的側面においては、制御理論における可制御性・可観測性の双対性や、最適化理論における主問題・双対問題の双対性に着目する。これらを参考に、グローバル制御の概念と、研究代表者の提案している「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結

合した計測手法（ビジュアルトラッキング手法）」の両者にまたがる数理的構造について調査を行う。

（2）研究が当初の予定通りに遂行されない場合として、「研究の方法（1）」において、既存のグローバル制御に関する成果と、研究代表者の提案するビジュアルトラッキング手法のあいだに双対性の構造を見つけられないことが考えられる。そのような場合は、研究代表者の提案するビジュアルトラッキング手法を基としたビジュアルサーボ手法（視覚フィードバック制御手法）を構築することで、グローバル制御とグローバル計測の関係性を明らかにする。

（3）理論の検証として、研究室所有の6軸ロボットアーム（三菱電機製 MELFA）もしくは移動ロボット（小型無人ヘリコプタ：Q4 Quadcopter）を用いたビジュアルフィードバック制御実験を行う。一般的に大規模・複雑な実験環境を整えることは金銭的または時間的に困難であるが、カメラ画像が作り出す画像空間を利用することで大規模・複雑な環境を容易に作り出すことができる。

4. 研究成果

（1）研究代表者が提案している「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合した計測手法」は、ある種の最適化問題に帰着される。一方、これまでに他研究者から提案されているグローバル制御に関する制御系設計・解析手法は、主に安定性の観点から考察されている。そのため、最適化問題における双対性について、直接対応する数理的構造を見つけることはできなかった。

また、最適化問題以外の双対性についても調査を行った。しかし、ローカル制御の概念と、研究代表者の提案している「大域的最適化と局所的最適化をフィードバック結合した計測手法」の両者にまたがる数理的構造を発見することはできなかった。

（2）「研究計画の方法（1）」に関する研究が当初の予定通りに遂行されないため、「研究計画の方法（2）」の手順を遂行することとした。もっとも簡単なビジュアルサーボ手法として、提案するビジュアルトラッキング手法とPID制御を組み合わせることが可能であることを確認した。これは、グローバル制御の表現の一つであるとも言える。

またさらに、上記の組み合わせの制御則に目標軌道を与えることで、軌道追従制御も可能であることも確認した。

（3）「研究成果（2）」の検証実験を、以下の手順で複数の条件で行った。

計測・制御対象は、単数または複数の小型無人ヘリコプタ（Q4 Quadcopter）とした（図3）。計測装置としては、機体自身に取り付

けられた無線カメラか、実験室天井に下向きに取り付け有線カメラを使用する。

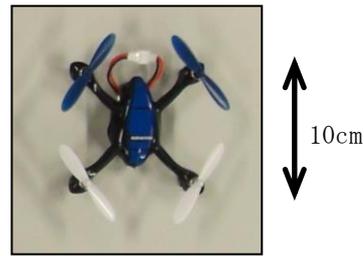


図3：実験に使用した小型無人ヘリコプタ



図4：カメラ天井取付型の実験装置。ヘリコプタ上部に、マーカを取り付けている。

制御の流れは以下の通りである（以下は機体取付型の説明であるが、天井取付型の制御の流れも同様）。まず、機体に下向きに取り付けたカメラが、機体の飛行範囲を撮影し、撮影画像を基地局の計算機に送信する。計算機は、撮影画像に対して「研究成果（2）」で提案した制御則を用いて制御入力を決定する。最後に決定された制御入力が、無線送信器を介して各機体に送信されることで、各機体が制御される。ただし、ビジュアルトラッキング対象が視野角から外れても制御できるように、複数のトラッキング対象を用意し、図5のような切り替えを行う。

与えられた目標軌道に対して提案手法を用いて、単数または複数の移動ロボットが制御できることを確認した。カメラ機体搭載型と、カメラ天井取付型の実験の様子を、それぞれ図6、図7にまとめた。実験においては、計測装置としてカメラ1台、計測・制御対象として小型無人ヘリコプタ1～3台とした。これらの台数は、計算資源等の許す範囲でさらに多数に拡張可能である。

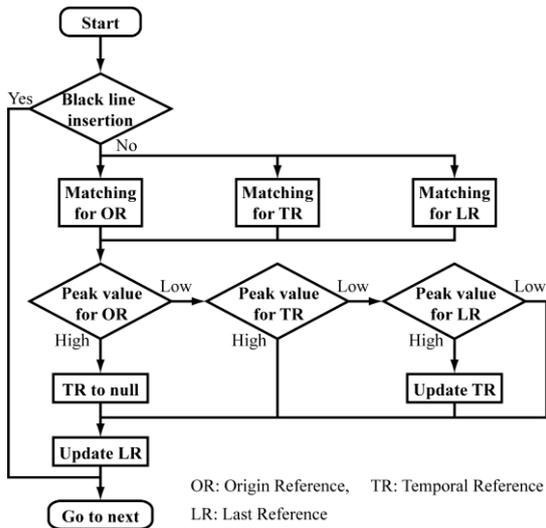


図5：トラッキング対象切替アルゴリズム

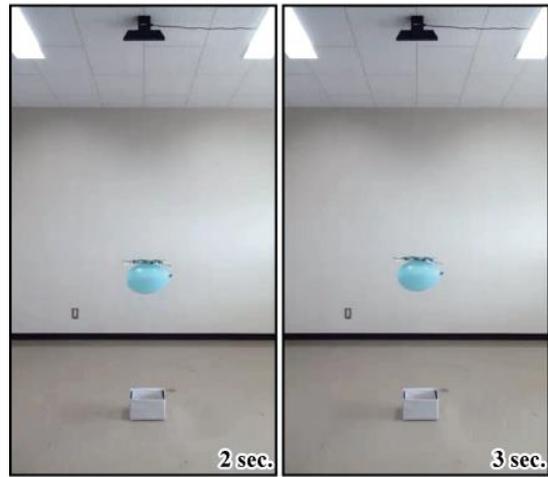
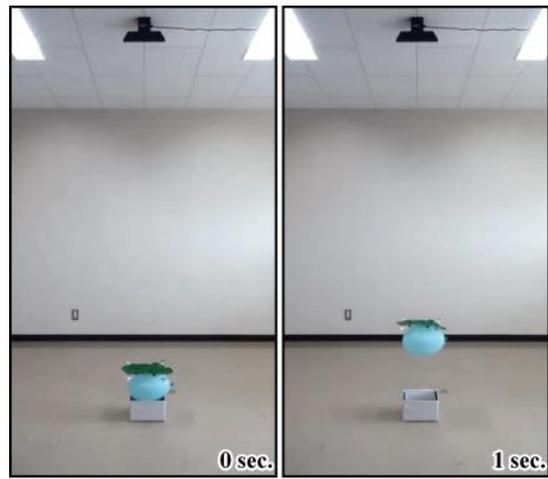


図7：単機体（カメラ天井取付型）の離陸・ホバリング制御

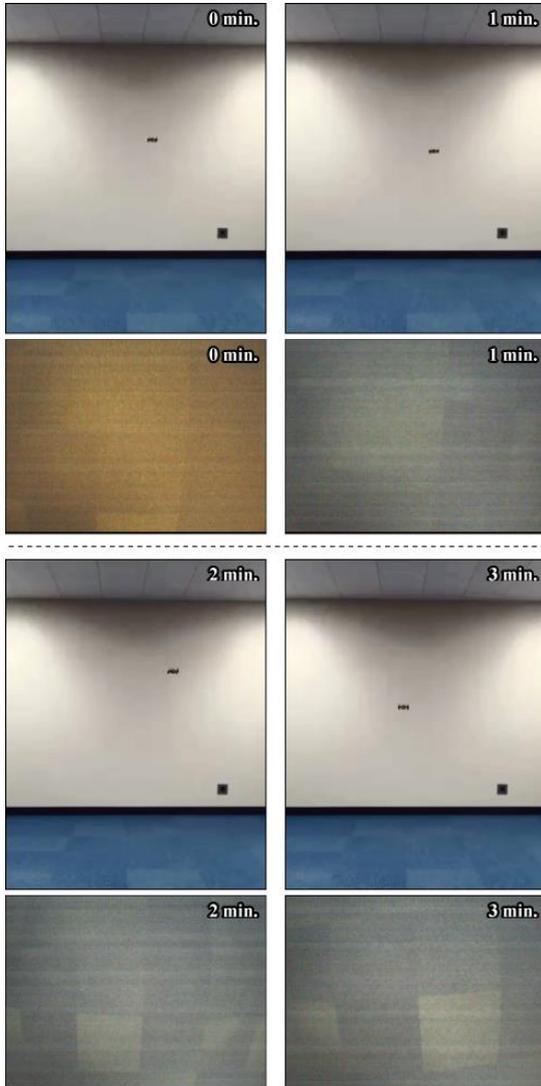


図6：単機体（カメラ取付型）のホバリング制御実験。上段は飛行の様子を撮影したスナップショット（黒い点のような物体がヘリコプタ）、下段は無線カメラの撮影画像。無線カメラが機体下に下向きに取り付けられている。

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0件）

〔学会発表〕（計2件）

① Yasushi Iwatani, and Hiroyuki Torikai. Flame extinguishment by cooperation of two aerial extinguishers. In 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 534-539, Nagoya, Japan, December 13, 2015.

② 八木橋諒, 岩谷靖, 鳥飼宏之. 複数の航空消火ロボットの協調による消火実験. 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 弘前, 2015年8月26日.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.hirosaki-u.ac.jp/~iwatani/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩谷 靖 (IWATANI, Yasushi)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10400300

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし