

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：23901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820169

研究課題名(和文) 動力学的非ホロノミック拘束を有す劣駆動システムのホロノミーに基づく制御手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of a holonomy-based control method for an underactuated system with dynamical nonholonomic constraints

研究代表者

伊藤 正英 (Ito, Masahide)

愛知県立大学・情報科学部・講師

研究者番号：60459237

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)：劣駆動マニピュレータや垂直離着陸機のような劣駆動システムは、動力学的非ホロノミック拘束(積分不可能な2階微分方程式)を受ける。そのようなシステムに対して、本研究はホロノミーに基づく制御手法を確立した。ホロノミーは、ある種の閉じた経路を運動した結果、間接的に得られる独立な状態変位量である。この制御手法は、正弦関数で構成した周期的制御入力によってホロノミーが得られるという解析結果に基づいており、運動計画への応用も容易である。

研究成果の概要(英文)：An underactuated system such as an underactuated manipulator and a vertical takeoff and landing aircraft are subject to dynamical nonholonomic constraints---second-order differential equations which is nonintegrable. This study established a holonomy-based control method for such a system. Holonomy results from a kind of motion that traverses a closed path in a reduced configuration space of the system. The established method is on the basis of an analytic result that appropriate periodic control inputs consisted of sinusoidal functions give holonomy. Also, it demonstrated to be easily applied to motion planning.

研究分野：ロボット制御

キーワード：制御工学 機械力学・制御 知能ロボティクス 劣駆動システム 非ホロノミック拘束 動力学的拘束  
ホロノミー

### 1. 研究開始当初の背景

産業で扱われる制御対象は、タスク実行に必要な自由度に対して、等しい数、あるいは冗長な数のアクチュエータを有している。これに対し、必要自由度より少ない数のアクチュエータをもつシステムとして、劣駆動システムがある。劣駆動システムは運動学的に(位置・速度レベルで)、あるいは動力的に(位置・速度・加速度レベルで)非ホロニック拘束(積分不可能な微分方程式で表現される拘束)に支配されている一方、その拘束があるからこそ必要自由度の運動が可能となる。

この性質を理解しやすい例は、車両の“切り返し”動作である(図1)。地面に対して車輪が滑らないとき、車両は瞬間的に車軸方向へ動けない運動学的非ホロニック拘束下にある。ところが、切り返し動作の結果、間接的に車軸方向への状態変位を得ることができる。図1の車両軌道を、車両の位置  $(x, y)$  と  $x$  軸に対する姿勢角度  $\theta$  の“位置空間”で表すと図2になる。 $x-\theta$  平面で閉軌道を描く運動となるよう、車両の推進速度  $v$  と回転速度  $w$  を操作することが、 $y$  軸方向の変位量獲得につながっている。この変位量はホロノミー、ホロノミー獲得のプロセスはホロノミーの原理と呼ばれている。

ホロノミーの原理に基づく制御は従来、2輪車両のほか、ヘビ型ロボット(参考文献①)、超音波モータ(参考文献②)等を対象に研究されているが、いずれも運動学的非ホロニック拘束をうける劣駆動システム(以降、運動学的劣駆動系と略す)に分類される。研究代表者の知る限り、ホロノミーの原理に基づいて動力的非ホロニック拘束をうける劣駆動システム(以降、動力的劣駆動系と略す)を制御した研究は本研究課題の申請時に

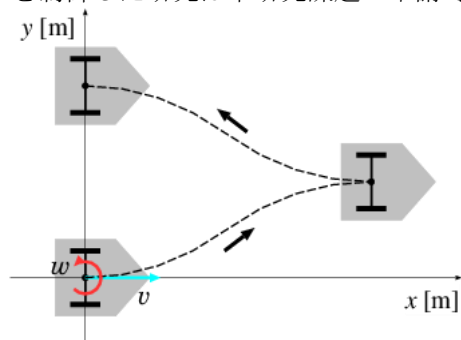


図1 車両の切り返し動作

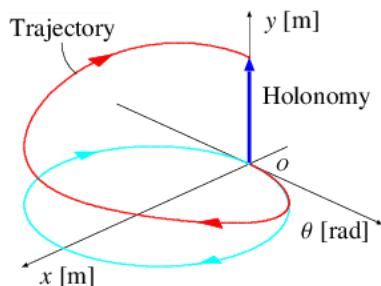


図2 切り返し動作によるホロノミー

は存在しなかった。他方、研究代表者は動力的劣駆動系の速度に関する運動方程式が運動学的劣駆動系の位置に関する運動方程式に似た構造をもつことに着目し、「動力的劣駆動系の運動についても“位置・速度混在空間”でホロノミーの原理が重要な役割を果たしている」という仮説を立てた。そして、加速度である制御入力を試行錯誤的に一種の周期関数で構成したところ、劣駆動マニピュレータの実機を用いた予備的な実験でこの仮説を裏付ける良好な結果を得た。

劣駆動マニピュレータをはじめとする動力的劣駆動系の制御では、従来、非線形な座標変換と入力変換によって、元のシステム表現を2階のチェインドフォームや線形システムに変換して扱うことが多かった(参考文献③など)。しかし、こうしたアプローチは変換後のシステムに対する制御則設計が容易である反面、制御則を破綻させるような特異点(変換が成立しない特別な状態)が存在したり、物理パラメータの同定に相当な精度が要求されたりする点で実用的とはいえない。研究代表者も過去実施してきた劣駆動マニピュレータに関する研究(参考文献④など)を通じ、この事実を痛感していた。

以上のことから、動力的劣駆動系の実用的制御を目指し、ホロノミーの原理からアプローチするという本研究の着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、動力的劣駆動系に対して、ホロノミーの原理に基づく制御手法を確立することを目的とした。研究目的を達成するため、以下のサブテーマを設定した：

- (1) 制御入力の振幅／周期に対するホロノミーの大きさや誤差に関する調査(仮説の実験的裏付け)
- (2) 理論の構築(基本アイデアの解析的裏付け)
- (3) 一定周期ごとに振幅／周期を変更するフィードバック制御則の設計および実験的評価
- (4) より実践的な制御手法への拡張

### 3. 研究の方法

制御入力として振幅・周期が調整可能な周期関数の組み合わせを想定して研究を進めた。サブテーマごとのアプローチは以下のとおりである。

- (1) 制御入力の振幅／周期に対するホロノミーの大きさや誤差に関する調査(仮説の実験的裏付け)

制御入力の振幅、周期それぞれを変化させた場合、ホロノミーがどのように抽出できるか、シミュレーションと実機実験の両方で網

羅的に調査し、両結果間のギャップについて考察することを当初計画していた。しかしながら、所属機関で使用可能な実機システムの製作が遅れたため、実際には仮説を支持する解析的結果を導き、それをシミュレーション結果によって裏付けるという方法を採用した。

(2) 理論の構築（基本アイデアの解析的裏付け）

「対象の運動方程式で速度に関する部分に着目すれば、ある周期関数の組み合わせでホロノミーを獲得できる」という基本アイデアに解析的裏付けを与え、本研究の骨子を形成した。

(3) 一定周期ごとに振幅／周期を変更するフィードバック制御則の設計および実験的評価

(1), (2)の結果をもとに、一定周期ごとにそのときの状態に応じて振幅、周期を適切に切り替えるフィードバック制御則を設計し、その制御則を実機で実験的に評価することが当初の計画であった。申請時に想定できなかった他業務の多忙化（平成 27 年度）や研究実験場所の変更（平成 28 年度）などから、実際にはフィードバック制御則の設計検討のみ行った。

(4) より実践的な制御手法への拡張

(3)で構築した制御則を基本にして、運動に重力の影響がある場合や軌道追従制御への拡張、実応用を視野に入れて受動関節の状態を外部センサから得る方式への改良などについて検討することを当初考えていた。実際には、通常の（劣駆動ではなく全駆動な）マニピュレータの視覚サーボを考え、劣駆動な問題設定に対する制御則設計を行った。

4. 研究成果

得られた研究成果をサブテーマごとにまとめると以下のとおりである。ただし、研究期間内に具体的な進捗、成果が得られていないサブテーマ(3)を除き、残りを進展した順にあわせて(2), (1), (4)と並べ替えた。

(2) 理論の構築（基本アイデアの解析的裏付け）

動力的非ホロミック拘束を有す劣駆動システムの標準形式の一つ、2 階のチェーンフォームを考え、一般の周期関数ではなく、具体的な正弦関数を用いることにより、解軌道およびホロノミーを解析的に求めた。その結果を可視化した例を図 3, 図 4 に示す。この例では、 $\xi_3$ のみをホロノミーとして抽出しており、他 5 つの変数はもとのゼロに戻っている。さらに、制御入力パターンを組み合わせることによって、容易に運動計画アルゴリズムを構成できることを示した。

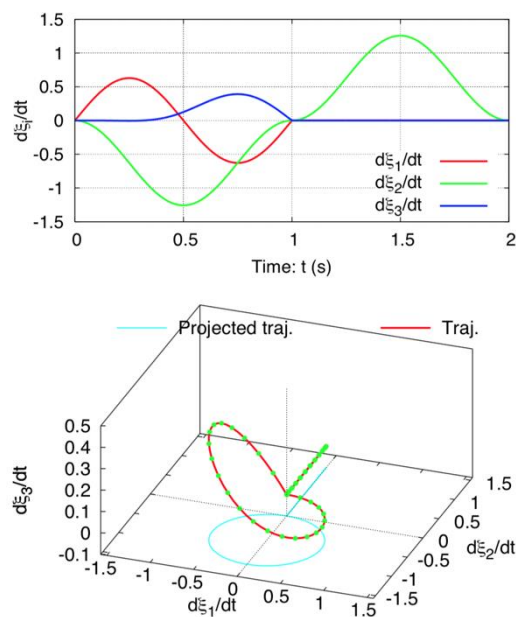


図 3 ある周期入力に対する速度応答

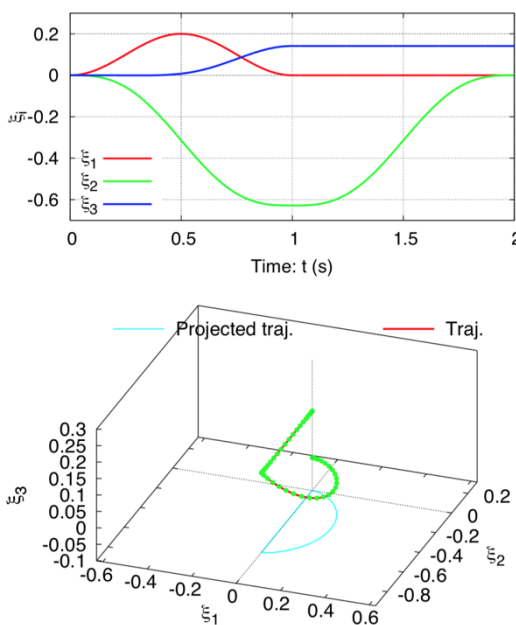


図 4 ある周期入力に対する位置応答

(1) 制御入力の振幅／周期に対するホロノミーの大きさや誤差に関する調査（仮説の実験的裏付け）

サブテーマ(2)での解析的裏付けによって副次的に、正弦関数の振幅・周期とホロノミーとの解析的関係を明らかにした。予備的な結果を含め、ここまでの成果は、学会発表②～④として公表した。

学会発表①では、3 関節劣駆動マニピュレータの制御へ応用した結果を公表した。2 つの静止状態間の運動例を図 5 に示す。リンクをスティック状に表現し、各時間区間の最終位置は赤色、それ以外は水色とした。青色の点は第 3 リンクの撃心と呼ばれる位置をプロットしたものである。第 3 リンクまわり運動方程式は、適切な座標変換と入力変換によっ

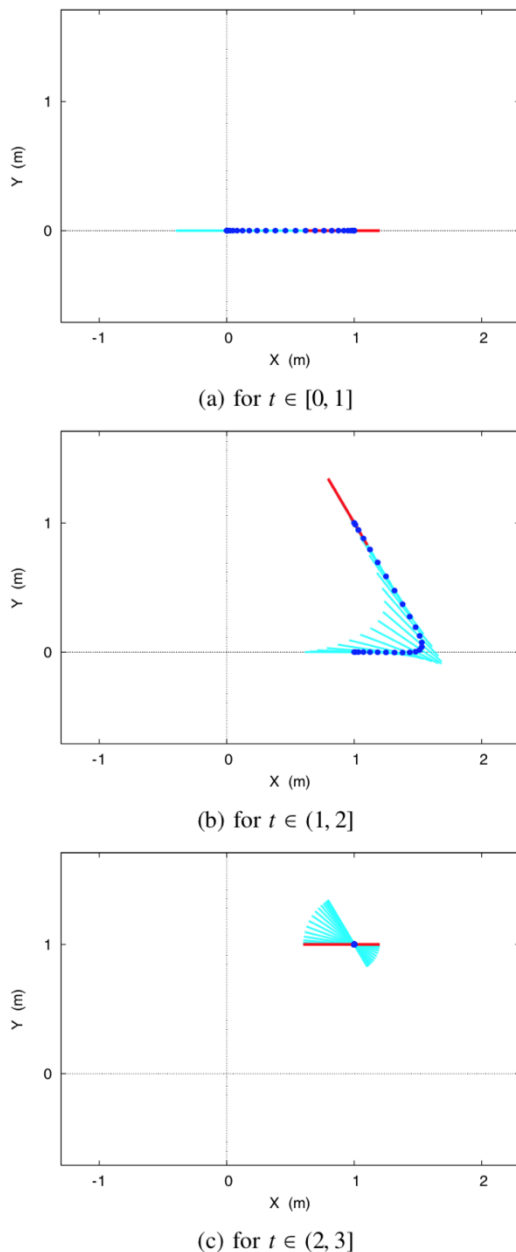


図5 第3リンクの振る舞い

て2階のチェインドフォームへ変換できることが知られている(参考文献⑤)。学会発表①ののち、周期制御入力的设计自由度が劣駆動マニピュレータの軌道選択に利用でき、障害物回避などに有効であることがわかった。

以上の成果をまとめた雑誌論文を現在執筆中であり、準備が整い次第投稿する。一方、当初計画からの遅れから研究期間内に遂行できなかった、構築した制御手法の実験的評価は継続課題として取り組む予定である。

#### (4) より実践的な制御手法への拡張

平成28年度に所属機関から機会を得た長期学外研究をきっかけに、University of Groningen (The Netherlands) の研究グループと、マニピュレータの視覚サーボに関する共同研究を開始した。劣駆動な問題設定のもと物理エネルギーに着目したアプローチで導出した制御則を、ホロノミーの観点で解釈でき

ると考えている。現在、実機実験の準備をしており、検証結果を得たところで成果を発表する予定である。

#### <参考文献>

- ① 石川 将人：三叉へび型ロボットの推進原理と周期入力による制御，計測自動制御学会論文集，Vol. 42, No. 5, 2006, pp. 520-528
- ② 石川 将人，木内 裕介：非ホロノミック力学に基づく球面型超音波モータのモデル化と制御，日本機械学会論文集C編，Vol. 75, No. 751, 2009, pp. 640-647
- ③ 荒井 裕彦：Underactuated manipulator の非ホロノミック制御，システム/制御/情報，Vol. 43, No. 10, 1999, pp. 553-560
- ④ 伊藤 正英，戸田 尚宏：IDA-PBC 法による3関節劣駆動マニピュレータの制御，計測自動制御学会論文集，Vol. 43, No. 9, 2007, pp. 788-797
- ⑤ Tsuneo Yoshikawa, Keigo Kobayashi, and Tetsuyo Watanabe: Design of a desirable trajectory and convergent control for 3-D.O.F manipulator with a nonholonomic constraint, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2000),

#### 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)

[学会発表] (計4件)

- ① Masahide Ito: Holonomy-based control of a three-joint underactuated manipulator, 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo2017), 2017; DOI: 10.1109/RoMoCo.2017.8003914
- ② Masahide Ito: A holonomy-based motion planning approach for a second-order nonholonomic system, 2nd IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2016), Invited Session, 2016
- ③ Masahide Ito: Holonomy-based motion planning of a second-order chained form system by using sinusoidal functions, 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo2015), 2015; DOI: 10.1109/RoMoCo.2015.7219748
- ④ 伊藤 正英：動力的非ホロノミック拘束を有す劣駆動マニピュレータのホロノミー抽出，第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，2015年

[その他]  
ホームページ等  
<http://researchmap.jp/itomasa/>  
[https://www.researchgate.net/profile/Masahide\\_ITO](https://www.researchgate.net/profile/Masahide_ITO)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 正英 (ITO, Masahide)  
愛知県立大学・情報科学部・講師  
研究者番号：60459237