

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760202

研究課題名(和文)冗長自由度温存による外力緩衝特性の解析とそれを活用したロボット運動制御法の確立

研究課題名(英文) Analysis of an External-Force-Dissipating Property Derived by Preserving Redundant Degrees of Freedom and Establishment of a Robot-Motion-Control Methodology with the Property

研究代表者

関本 昌紘 (Sekimoto, Masahiro)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・講師

研究者番号：40454516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：多関節ロボットの制御において、作業空間フィードバック制御により生じる冗長自由度は、その状態が外力に沿ってエネルギー消散しながら遷移する特性を有する。この外力緩衝特性の解析、及びその機構由来の機能と作業実現機能を併せ持つ運動制御法の構築・評価を行った。作業変数とその零空間変数に着目したロボットの運動方程式により、外力緩衝特性を定式化した。この結果を踏まえ、外力緩衝機能付き運動制御法を組み込んだロボットアームの手先操作、バイラテラル遠隔操作、食膳運搬作業において、外力緩衝時の作業精度を調査した。本手法により、ロボットが力覚センサ無しに想定外の外力に適応的に倣い、作業を継続できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In control of multi-joint robots, redundant degrees of freedom which are derived by task-space feedback control possess a property that the state transits along external forces in energy dissipation. We analyzed the external-force-dissipating property and built and evaluated a motion control methodology combining the potential mechanical function and the task-fulfilled function. The property was formulated in equations of motion of a robot on task variables and their null-space variables. Based on the result, we investigated the task accuracy during external-force dissipative motions in the cases that a motion control method with the external-force dissipation function was incorporated in endpoint manipulations, bilateral tele-operations, and serving tasks. The investigations concluded that the control method allows a robot to adaptively cope with an unexpected external force and continue a task without force sensors.

研究分野：工学

キーワード：ロボットアーム 自由度 制御 接触 適応

### 1. 研究開始当初の背景

人と協働する製造業向けロボットや家庭向けサービスロボットに見られるように、多様な状況・作業を想定し、ロボットの関節数は増加傾向にある。

3次元空間における任意状態への物体操作では、ロボットは最低6関節を必要とする。これまでに、ロボットが指定作業を実現した上で独立に動ける余剰動作(冗長自由度)を積極的に制御し、作業時間の短縮、操作性・エネルギー効率の向上、障害物の回避などを実現する手法が確立されてきた。一方で、ロボット制御において冗長自由度をシステム内に温存しておく利点はあまり議論されていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、多関節ロボットに冗長自由度を残すことで生まれる外力緩衝特性の解析、その機構由来の特性を活かしたロボット運動制御法の確立を目的とした。ロボットに関節目標値を定めてフィードバック制御する代わりに、作業目標値を直接フィードバック制御する。このとき、目的を達成する冗長自由度ロボットの姿勢は無数にあるため、外乱に対し、ロボットは目的の作業を可能な限り継続しつつ、外力に依って姿勢を変える。その際、外力により及ぼされるエネルギーは、ロボットの関節粘性により吸収・消散される。この外力緩衝特性の定式化を目的とした。また、この機構由来の受動的な冗長自由度特性と作業遂行のための能動的な制御を併せ持つロボットの運動制御法の確立およびその効果の調査を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 外力緩衝特性の動力学解析

外力緩衝の原理解明のため、これをロボットの制御入力込み運動方程式(閉ループダイナミクス)に着目することで定式化した。作業目的を任意位置でのロボットアームの手先維持(定置制御)とし、作業目標値の直接フィードバックを転置ヤコビ行列制御法により実現した。

また、作業継続と外力緩衝を両立する関節粘性の条件を調査した。外力緩衝効果を高めるには、高い関節粘性が好ましい。一方、高い関節粘性は作業精度の低下を招く。これらを両立する関節粘性の条件について、関節間のバランスに着目した調査を行った。

#### (2) ロボットアームの開発

外力緩衝特性の解析および外力緩衝機能を組み込んだ運動制御法の評価のため、関節配置の異なるロボットアーム3台を開発した。市販の産業用ロボットアームの使用も検討したが、関節配置の変更を想定し、すべて自前で設計・製作した。所有の小型ロボットアーム2台を再利用して6関節食膳運搬ロボット、グリッパー付き5関節遠隔操作ロボ

ットを開発し、新たに人腕サイズの7関節ロボットアーム1台を開発した。前述のロボット2台を用いた外力緩衝実験の結果を踏まえ、非制御時に人の手で関節動作可能、トルク制御可能、土台部と手先部への自由度集中をこのアームの設計条件とした。

#### (3) ロボット運動制御法の確立と評価

ロボットアームの手先操作、異構造ロボットアームのバイラテラル遠隔操作、食膳運搬時の外力適応に外力緩衝機能付き運動制御法を組み込み、作業・関節配置の違いによる外力緩衝効果、作業目標値への到達精度、本手法の適用拡張性を調査した。

### 4. 研究成果

#### (1) 外力緩衝特性の定式化

ロボットの制御入力込み運動方程式を作業変数とその零空間変数からなる運動方程式に座標変換することで、冗長自由度の外力緩衝特性を定式化した。

$n$  関節ロボットアームの運動方程式は、

$$H(q)\ddot{q} + \left( \frac{1}{2} \dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right) \dot{q} + g(q) = u + \tau_{ext} \quad (1)$$

と表せる。ここに、 $H(q)$  は慣性行列、 $S(q, \dot{q})$  は遠心力・コリオリ力に関連する歪対称行列、 $g(q)$  は重力トルクベクトル、 $\tau_{ext}$  は外力が各関節に及ぼすトルクベクトルである。また、 $u$  は各関節への制御入力ベクトルであり、

$$u = -C\dot{q} - J^T(q)(K_d\dot{r} + K_p\Delta r) + g(q) \quad (2)$$

と今回構成し、転置ヤコビ行列  $J^T(q)$  に基づき、作業目標値の直接フィードバック制御を実現した。(2)式において、 $C$  は関節粘性行列、 $\Delta r$  は  $m$  次元からなる作業変数の目標値ベクトル  $r_d$  と現在値ベクトル  $r$  の差 ( $\Delta r = r - r_d$ )、 $K_d$  と  $K_p$  はフィードバックゲイン行列である。(2)式の制御入力を(1)式に代入して得られる閉ループダイナミクス

$$H\ddot{q} + \left( \frac{1}{2} \dot{H} + S + C \right) \dot{q} + J^T(K_d\dot{r} + K_p\Delta r) = \tau_{ext} \quad (3)$$

により、ロボットの関節動作(状態遷移)が決まる。

(3)式において、ロボットの自由度は  $n$ 、作業変数の数は  $m (< n)$  であるので、ロボットは作業目標値  $r_d$  を満たした状態で動きうる。この零空間動作  $Z(q)\dot{\eta}$  を含め、関節空間と作業空間には、逆運動学の一般解

$$\dot{q} = J^\dagger(q)\dot{r} + Z(q)\dot{\eta} \quad (4)$$

が成り立つ。ここに、 $J^\dagger(q)$  は  $J(q)$  の擬似逆行列、 $\eta$  は  $(n-m)$  次元の零空間変数ベク

トルである．そこで，(3)式の閉ループダイナミクスを(4)式の関係を使って変換し，変換行列と $\bar{H}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{C}$ の乗算部分をそれぞれ新たに $\bar{H}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{C}$ と表せば，

$$\bar{H} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \left( \frac{1}{2} \dot{\bar{H}} + \bar{S} + \bar{C} \right) \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d \dot{r} + K_p \Delta r \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (J^\dagger)^\top \\ Z^\top \end{bmatrix} \tau_{ext} \quad (5)$$

を得る．この関係から，ロボットへの外力作用に対し，作業変数は位置フィードバックゲイン $K_p$ を高くしておくことで目標値を維持するように振る舞う．一方，零空間変数は，(2)式の制御入力で目標値は無く粘性のみが作用するため，外力に倣いながらエネルギーを消散するように振る舞う．(5)式により，冗長自由度の外力緩衝を定式化した．

### (2) 作業継続と外力緩衝を両立する条件

一連の関節粘性のバランスに着目し，作業継続と外力緩衝を両立する条件を調査した．(5)式より，適度に高い関節粘性行列 $C$ は外力緩衝効果の向上に貢献するが，作業変数 $r$ の収束性を損ねる可能性がある．そこで，6関節食膳運搬ロボットの手先姿勢2自由度の水平維持を作業目的とし，(a)ロボットの土台部の関節粘性を高くした場合，(b)手先部の関節粘性を高くした場合，(c)手先部の関節粘性から関節固有の摩擦力をキャンセルした場合，(d)関節粘性制御をゼロとした場合（関節固有の摩擦力のみ）の4種類の関節粘性設定において，ロボット本体部に人の手で外力を加える実験を行った．外力緩衝中の最大作業誤差は条件(a)で0.52[deg]，条件(b)で2.03[deg]となり，作業継続と外力緩衝の両立には，関節粘性を土台部で高く，作業部で低く設定するのが良いことを明らかにした．

また，所有のロボットアーム2台を使い，手先目標値の変更に対する作業精度と外力緩衝性能を調査した．外力緩衝を効果的に得るには冗長姿勢の広さが重要となるが，これは目標値設定に依存する．様々な目標値に対して冗長姿勢を広く取るには，作業部と土台部に自由度を集中する関節配置が効果的であると結論に至った．この結果は，7関節ロボットアームの設計に反映された．

### (3) ロボットアームの手先操作への適用

作業目標値の数の違いに対する外力緩衝時の手先精度および外力倣い時の力の大きさを調査した．製造業向けロボットの基本動作の一つに，手先の位置決めがある．手先3変数，姿勢3変数，位置姿勢6変数の維持を作業目的とし，(2)式の外力緩衝機能付き運動制御法を7関節ロボットアームに適用した．手先精度1[mm]，0.1[deg]を保証する制御設定に対し，外力緩衝時の最大誤差はいず

れの場合も3[mm]，0.3[deg]であった．作業目標値の数の違いに対し，最大誤差に違いは見られなかった．外力倣い時の力の大きさは，3変数指定時で5[kgf]，6変数指定時で8[kgf]であり，非制御時の関節動作に必要な力と同程度で動作することを確認した．

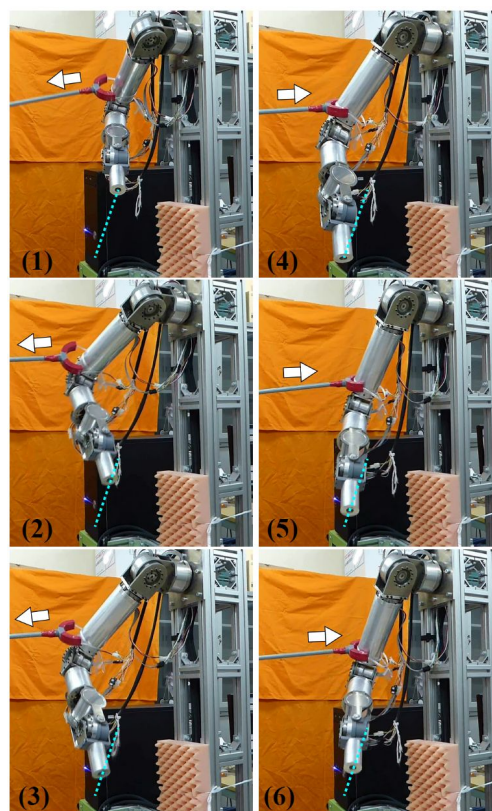
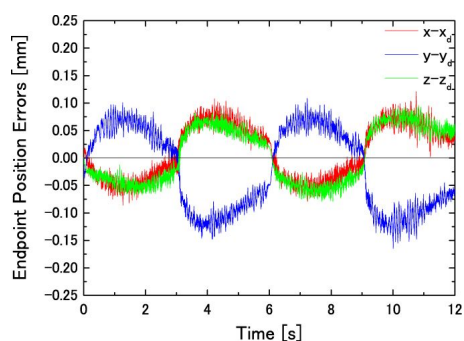
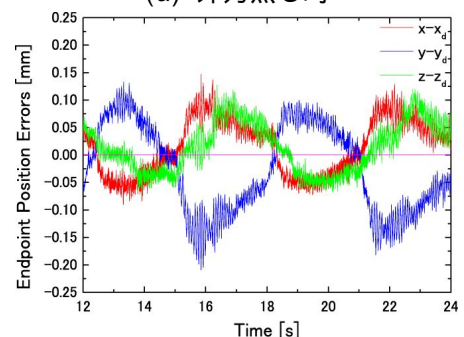


図1 手先往復作業中の外力緩衝



(a) 外力無し時



(b) 外力緩衝時

図2 手先往復作業中の手先誤差応答

作業目的を 6 秒間・15[cm]の手先往復運動とした場合に、同様の外力緩衝実験を行った。外力無し時に最大手先誤差 0.17[mm]となる制御設定に対し、外力緩衝時の最大誤差は 0.21[mm]であり、外力緩衝時の作業部への影響は 0.05[mm]以下に抑えられることを明らかにした(図 1, 2)。

これらの結果から、目標値の数や定置・追従制御の違いに対して外力緩衝時の最大作業誤差に違いが見られないことを示した。また、作業目標値の数を目的達成のための最少に留めることで、作業精度を落とさずに冗長姿勢を広げられることを明らかにした。

#### (4) バイラテラル遠隔操作への適用

操作側で 3 関節、遠隔側で 5 関節のロボットアームを用いたバイラテラル遠隔操作に本手法を適用し、制御対象の拡張性を調査した。遠隔ロボットが手先グリッパーで対象物を把持する最中に、手先部以外で障害物と接触する場面を想定した。各ロボットの制御器には、(2)式においてお互いのロボットの現在手先位置を作業目標値にしたものを用いた。障害物との側部接触に対し、遠隔ロボットは冗長姿勢を遷移し、手先作業を継続する結果を得た(図 3)。このとき、操作者は障害物との側部接触を感じず、接触への配慮無しに手先作業を継続できた。一方で、ロボット手先部での接触には、操作者はその反力を感じ取れた。これらの結果から、本手法がバイラテラル制御に拡張できること、操作部以外の接触に対して外力緩衝特性が適応的に機能し、接触対処の簡易化に貢献することを明らかにした。

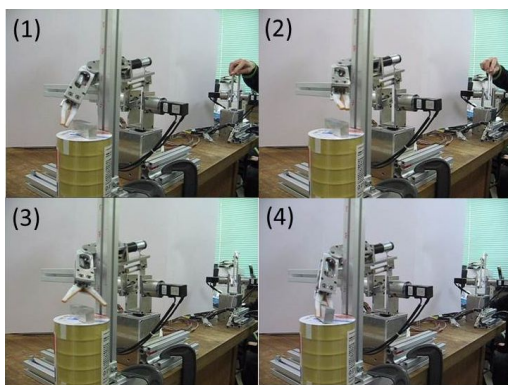


図 3 障害物との側部接触を伴う物体操作

#### (5) 食膳運搬時の外力適応への応用

ロボット手先部での水平維持と本体部での外力倣いの 2 種類の力適応が求められる食膳運搬ロボットに本手法を適用し、制御入力機能拡張性を調査した。本体部の外力倣いには、(2)式の外力緩衝機能を用いる。しかし、食膳運搬では、運搬物の質量や重心位置の変化が想定され、それらの情報は事前に得られない場合も多い。このような状況において、(2)式の制御入力のみで運搬時の手先水平維持は難しい。そこで、運搬物の質量と

重心位置を推定し、運搬物に合った抗力調整を行う適応的重力補償法を(2)式に追加した。この制御入力を 6 関節食膳運搬ロボットに適用し、未知質量の運搬物(実際は 150[g])の載せ降ろし、本体部への外力作用を行ったところ、手先部の状態を保ちつつ、本体部では外力に倣う結果を得た(図 4, 5, 6)。このとき、外力緩衝時の最大誤差は手先高さで 2[mm]、手先姿勢で 0.3[deg]であった。この結果より、制御入力への機能追加時でも外力緩衝効果が保たれること、本手法により力覚センサ無しに想定外の力作用への適応動作と作業維持が可能であることを明らかにした。

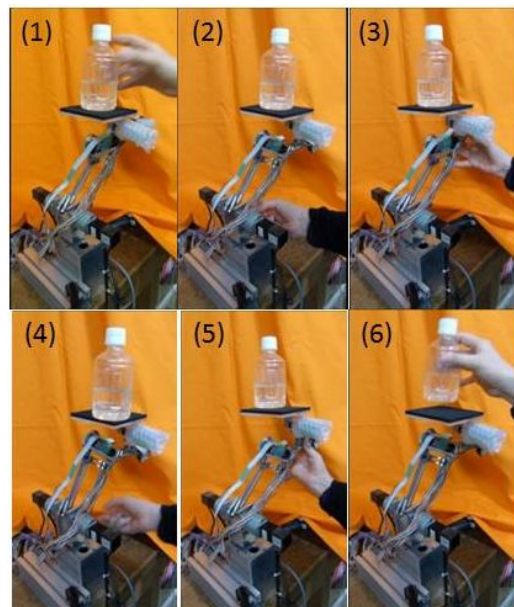
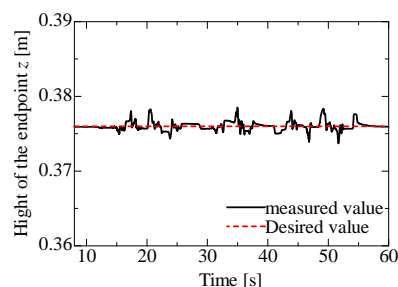
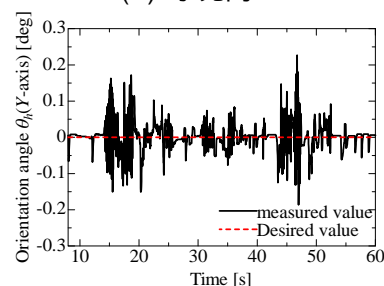


図 4 力覚センサ無しに手先水平維持と外力倣いを実現する食膳運搬ロボット



(a) 手先高さ



(b) 手先姿勢

図 5 食膳運搬作業時の手先変数応答

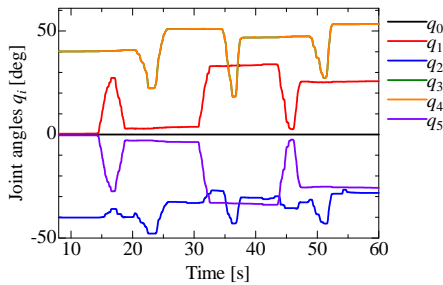


図6 食膳運搬作業時の関節角度応答

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計16件)

Sekimoto M. and Funamoto H., Deceleration control of null-space motions induced by external forces in a robotic serving task with maintenance of endpoint attitudes, SICE Annual Conference 2016 (SICE2016), 2016年09月20~23日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)(発表決定)

Sekimoto M., Ikeda T., Kawamura S., Takegaki M., and Kimura H., Gripping a supporting object with an uncertain state in task space control eliminating some of control variables, SICE Annual Conference 2016 (SICE2016), 2016年09月20~23日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)(発表決定)

Sekimoto M., Tanaka T., Takegaki M., Kawamura S., Bae J.-H., and Kimura H., Alleviation of excessive inputs by using redundant degrees of freedom of a manipulator in turning a crank, SICE Annual Conference 2016 (SICE2016), 2016年09月20~23日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)(発表決定)

Sekimoto M., Fujimoto K., Bae J.-H., and Kimura H., Endpoint tracking accuracy of a redundant manipulator controlled in task-space feedback during reactions to external forces, The 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), 2015年12月05~08日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

関本昌紘, 藤本京吾, Ji-Hun Bae, 冗長自由度ロボットアームの力覚センサレス外力順応における手先精度, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年09月03~05日, 東京電機大学(東京都・足立区)

関本昌紘, 吉田俊輔, 川村貞夫, 手先位置制御のみによる6関節ロボットアームのツールへの手先姿勢順応, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015

年05月17~19日, みやこめっせ(京都府・京都市)

吉田俊輔, 関本昌紘, 川村貞夫, 冗長自由度を利用した探索ロボットの先姿勢制御なしでの瓦礫支持実現, 日本機械学会北陸信越支部学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, 2015年03月06日, 新潟工科大学(新潟県・柏崎市)  
 浜田恭輔, 関本昌紘, 冗長自由度温存と力覚センサ利用によるロボットアームの外力順応の違いに関する実験的検討, 日本機械学会北陸信越支部学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, 2015年03月06日, 新潟工科大学(新潟県・柏崎市)

築場大典, 関本昌紘, 木村弘之, 食器運搬ロボットの先水平維持時における手先力・モーメント荷重および途中リンク部外力への対応, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014年5月25~29日, 富山市総合体育館(富山県・富山市)

長橋光之, 関本昌紘, 作業座標繰返し学習制御によるアーム本体部障害物接触時の手先作業精度の向上, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年09月04~06日, 首都大学東京(東京都・八王子市)

築場大典, 関本昌紘, 木村弘之, サーバロボットの運搬作業時におけるリグレッサを用いた未知荷重への適応と外力に対するなじみの両立, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年09月04~06日, 首都大学東京(東京都・八王子市)

築場大典, 関本昌紘, 木村弘之, 作業座標PIDフィードバック制御によるサーバロボットの先負荷支持とアーム部外力へのなじみ対応の同時実現, 平成24年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2012年09月01~02日, 富山県立大学(富山県・射水市)

築場大典, 関本昌紘, 安井貴信, 木村弘之, 6関節ロボットアームの手先姿勢維持における冗長自由度を利用した外力適応, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年05月27~29日, アクティシティ浜松(静岡県・浜松市)

安井貴信, 関本昌紘, 築場大典, 木村弘之, 6関節遠隔操作ロボットの先位置制御における冗長自由度温存による障害物適応, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年05月27~29日, アクティシティ浜松(静岡県・浜松市)

安井貴信, 関本昌紘, 築場大典, 木村弘之, 冗長自由度温存による接触順応能力を有する6関節遠隔ロボットの開発, 第24回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2012年05月16~18日, 富山国際会議場(富山県・富山市)

築場大典，関本昌紘，安井貴信，木村弘之，冗長自由度を利用した外力適応と手先姿勢保持を両立する 6 関節ロボットシステムの開発，第 24 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム，2012 年 05 月 16～18 日，富山国際会議場（富山県・富山市）

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

関本 昌紘（SEKIMOTO, Masahiro）

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・

講師

研究者番号：40454516