衝撃的荷重負荷に対する冗長多関節ロボットの 安定姿勢と位置決め復帰動作の実現

—仮想目標軌道整形休止と微分ゲイン増大による方法—

井上 貴浩^{*1} 宮田 龍一^{*2} 佐藤 克樹^{*1}
植田 尊大^{*1} 平井 慎一^{*3}

Realization of Stable Position and Recovery Motion of a Multi-jointed Robotic Arm against Impulsive Load

—Holding of Shaping Process of Virtual-desired-trajectory and Instant Increase of
Differential Gains—

Takahiro Inoue^{*1}, Ryuichi Miyata^{*2}, Katsuki Sato^{*1}, Takahiro Ueda^{*1} and Shinichi Hirai^{*3}

This paper proposes a simple control algorithm to realize stable position of a multi-jointed robotic arm with absorbing impact force exerted on the tip of the redundant robotic arm. Also, recovery motion to a previous orientation maintained prior to the impact is easily realized by a present control algorithm. This control method is based on *virtual desired trajectory* technique mentioned on our previous research, which is formed by an integral controller that accumulates state-steady error of the tip positions of the robot. The impact force absorption can be realized by temporal stop of the integral controller and instant increase of differential gains utilized at PD controller for the robot motion, resulting in a hold of the virtual desired trajectory of joint angles and in the inhibition of back action against collisional obstacles. This method can be applied to conventional motor-driven mechanism, as a result, we can show that this proposed control algorithm can be applied without any change for the motor-driven structure, as well as an antagonistic wire-driven mechanism. Finally, we verify effectiveness and availability of the impact force absorption method by numerical analysis.

Key Words: Impulsive Load, Integral Controller, Absorption, Multi-joint, Wire-driven

1. 緒 言

「近い将来ロボットが一家に1台導入される」と言われて久しいが、人とロボットが協調し共存できる社会は親和性の極めて高いロボット開発の成否にかかっている。少子高齢化社会で起こり得る種々雑多な問題を解決できるロボットや、安心・安全な社会の実現に役立つロボット、便利でゆとりある社会の実現に役立つロボットなど、ロボットが活躍できる場面は極めて多い[1]。しかしながら、現状においては人の足元程度の低い位置で動作するお掃除ロボットが普及しているに過ぎない。各家

庭への汎用ロボットの導入事例が皆無であることを考慮すると、共存社会の実現にはまだハードルが高いことが示唆される[2]。そのハードルとは共存環境においてロボットが人に危害を加えてしまうことであり、傷害を生じさせないための衝突回避や障害物回避問題が従来からの主流となっている[3]。それらの試みは極論すれば、人とロボットが接触することのない環境を指向するものであり、共存社会を目指すものとは言えない。本研究の目指すところは、近年多発する大規模災害に関して防災から減災へとシフトする流れに類似する。ロボットのいる暮らしの中で起こり得る衝突やそれに起因する傷害を完全に抑え込むのではなく、傷害の程度を和らげる取り組みが必要だと考えられる。日常生活に転じて見れば、インパルス状に力が加わる衝突や衝撃ではないにしても、荷物の素早い持ち上げ動作や荷物の受け渡し動作などのように重量物による短時間での重力方向への荷重負荷を受けることが多い。本稿ではこのような負荷を衝撃的荷重負荷と呼ぶが[7]、このような負荷が発生する状況において負荷印加時のロボットの安定姿勢を維持しながら連続動作にスムーズに遷移できる制御手法を議論する例はほとんどない。

原稿受付 2015年7月15日

^{*1}岡山県立大学情報工学部人間情報工学科

^{*2}岡山県立大学情報系工学研究科システム工学専攻

^{*3}立命館大学理工学部ロボティクス学科

^{*1}Dept. of Human Information Engineering, Okayama Prefectural Univ.

^{*2}Graduate School of Computer Science and Systems Engineering.

^{*3}Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

■ 本論文は有用性(要素分野)で評価されました。

そのようなことから本稿では、垂直二次元面内での作業座標変数に対して関節数が一つ多い冗長多関節ロボットアームの手先に衝撃的荷重負荷が発生したときに振動のない安定姿勢を維持できる制御手法を提案する。また、負荷印加前のアーム姿勢に復帰可能な簡易な手先位置決め制御アルゴリズムを述べ数値解析例としてその有効性を検証する。その手法は、先行研究[26][27]において提案している機構の冗長性の有無に依存しない簡易な手先位置制御則に基づく。本手法は、手先位置を直交座標系で制御しながら、ヤコビ行列を使用せず関節座標系で「仮想目標軌道」を整形するという方法を採用している。本稿では、この制御則を基本として、手先負荷印加時の冗長多関節ロボットの安定姿勢とその後の位置決め復帰動作を実現する制御手法の提案を行う。具体的には、関節角の仮想目標軌道を整形する積分コントローラを衝撃的荷重の負荷直後に休止し、加えてロボットへの指令トルクの一部となる微分コントローラの微分ゲインのみを増大する。この操作により衝撃的荷重負荷印加時の振動的挙動と不意の反動を抑え、続くロボットの元の姿勢への復帰動作を「休止解除」により容易に実現可能であることを明らかにする。

2. 関 連 研 究

緒言で述べたように、水平方向や重力方向への衝撃的荷重負荷が加わってもなおロボットが停止せずに連続動作を継続し与えられたタスクを実行するための制御系設計に関する研究はほとんど見受けられないのが現状である。一方で、ロボットに加わるインパルス状の衝突を想定した衝撃力緩和を目的とした研究は従来より多く行われている。それらは、手先効果器が環境と衝突する場合の数学モデルの導出[4]や宇宙ロボットを想定した浮遊リンク系の衝突運動の定式化に関する研究から始まっている[5]。立矢らは、衝撃的負荷にも耐えうるロボットアームの設計を目的として、衝撃特性図を作成し姿勢を維持するための静的保持トルクの3倍で強度設計ができることを明らかにしている[6][7]。また、吉田らはPUMA560型ロボットアームを用いて仮想ロータ慣性を同定し、衝突前の運動から衝突後の運動や衝撃力を予測することに成功している[8]。しかし、これらの研究ではトルク特性を踏まえた設計上の適切な指針を与えるにとどまり、また、フライト実験での浮遊リンク系の受動制御に関するものであり重力下での手先の能動制御に関しては触れていない。

他方で近年では、柔らかいチューブが衝撃力を受けたときに発生する内部圧力の変化を計測し衝突を検知するセンサを用いたシステム[9]や、ロボットリンクに装着可能なポリウレタン樹脂で製作された空気圧緩衝材とER流体クラッチの組み合わせによる衝撃力緩和装置[10][11]の開発が挙げられる。しかし、これらの研究は衝撃力を緩和するための力検出センサシステムの基礎特性を検証するものであったり、アクチュエータのない受動関節に緩和装置を取り付けた場合の振動抑制効果の検証が目的となっている。また、人に傷害を与えない安全基準[12][13]に基づいて、リンクを覆う緩衝カバーの厚みの設計やリンク重量および動作速度に上限を設ける試みもあるが[14]、実タスクを達成するためのロボット制御に関する研究報告ではない。

本稿の目的とより近い研究例としては、力制御やインピーダ

ンス制御の分野がある[15]~[17]。しかしながら、これらは重力やコリオリ力などの非線形補償器や正確なダイナミクスモデルに基づくフィードフォワード制御、ならびに手先外力の実時間でのセンシングを必要とする。加えて、各関節にアクチュエータを直接配置した従来型のロボット機構が制御対象であって、本稿で扱うような冗長自由度でかつ弾性要素を関節周りに拮抗的に配置する筋構造模倣型ロボットへの適用は想定されていない。また、De Lucaら[18][19]は、ロボットの関節角とモータ回転角との差分から求められる機構的な関節剛性を利用して衝突同定指標を定義し、衝突の有無と方向を検出するアルゴリズムを提案している。検出結果は衝撃力の大きさと方向を含むため、接触に対する逆向きのトルク目標を指標の大小に合わせ生成し回避動作を実現している。しかしながら、ロボットの重力補償が必須であり、センサによる関節トルクとその変化率に加えて関節角速度が不可欠となっており、各計測値の微分計算によるノイズの影響により引き動作に振動が生じる傾向が現れている。また、外力に起因する関節トルク変化は衝突や接触によって生じるため衝突直前での適用は難しい。

また、衝突を含むマニピュレータの安定制御に関する研究もなされているが、挿入動作や倣い動作を目的としたコンプライアンス制御に関するアプローチであり、急激に加わる荷重負荷を想定した制御系とはなっていない[20]~[23]。また、手先への外力印加時の制御トルクの変化に着目した衝突検出アルゴリズムが提案されているが[24]、検出精度に焦点を絞っており、外力解放後のロボットの復帰動作を含めた議論とはなっていない。さらに、1リンク柔軟アームによる衝突検知アルゴリズムが提案されているが[25]、剛体多リンク系への適用は述べられていない。

以上のように、近年研究が盛んとなっているヒトの筋構造を模倣した上肢ロボットにおける手先外力に対する応答を詳しく検証した研究例はほとんど見受けられない。そのようなことから、本稿では関節駆動に非線形バネとワイヤを利用した上肢多関節ロボットを制御対象とし、手先への衝撃的荷重負荷に対する振動と反動のない安定姿勢が、関節トルク値取得や重力補償を施さなくても実現できる制御アルゴリズムを提案する。

3. 3 関節アーム機構と従来制御手法の再記

本稿で取り扱う多関節ロボットは先行研究[26]において定義した二次元 xy 平面内で動作する3関節を有するロボットアームであり(**Fig. 1**参照)、 y 軸負の方向に重力が加わるものとする。本稿では、電動モータを各関節に取り付けた駆動方式(以下ではモータ駆動系と呼ぶ)と、非線形バネを介してワイヤを巻き上げ各関節を拮抗的に引っ張る駆動方式(以下ではワイヤ拮抗駆動系と呼ぶ)それぞれによる垂直二次元平面内で動作する冗長自由度ロボットを制御対象とする。後者のワイヤ拮抗駆動系では拮抗配置されたワイヤを直流モータで引っ張ることで各関節を駆動する。したがって、すべてのワイヤを個別で駆動するため3関節機構では合計六つのアクチュエータが必要となる。いずれの駆動系においても利用する共通プラットフォームである3関節アームが制御対象となり、そのモデル化を行うと次式となる。

Fig. 1 Three-joint robotic arm model

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + S(q) = u. \quad (1)$$

上式において、 M は慣性行列、 D は粘性行列、 c は遠心力とコリオリ力による非線形項、 g は重力項、 S は非線形バネの伸び縮みにより生じるポテンシャル力を意味し、右辺の u は制御入力に相当する。また、 q は各関節角 θ_i とモータ回転角 ϕ_j を併せた一般化座標であり、次式のような九次元ベクトル変数となる。

$$[\theta_i, \phi_j], \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, \dots, 6. \quad (2)$$

ここで、式 (1) は非線形連立方程式であり、第 i 関節の制御入力 u_i が θ_i 以外の運動にも影響を及ぼす干渉系である。加えて、弾性要素のないモータ駆動系においては式 (1) のポテンシャル力は存在せず、式 (2) は θ_i のみが要素となることに注意する。

次に、ロボット機構の冗長性の有無や駆動系の別を問わず適用可能な簡易な手先位置制御手法 [26] [27] を再記すると次式となる。

$$u_i = -K_{pi}(\theta_i - \theta_i^d) - K_{di}\dot{\theta}_i + \tau_{bi}, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$u_{atg} = \tau_c \text{ (const.)}. \quad (4)$$

ここで、式 (3) は多関節アームの各関節を重力に反して屈曲させる主動筋側の制御入力であり、式 (4) はワイヤ拮抗駆動系のみに見れる制御量で拮抗筋側の入力となる。ただし、これらすべての制御入力は各関節から離れた位置にあるアクチュエータによるワイヤの巻き上げトルクとなる。上式において、第 i リンクの比例・微分ゲインをそれぞれ K_{pi} , K_{di} とし、仮想的な関節角目標を θ_i^d とする。また、制御入力に重畳するバイアストルクを τ_{bi} と定義し (付録 A 参照)、 τ_c は拮抗配置されたワイヤの弛緩を防止するための張力を生成するトルクである。他方、上記した関節角の仮想目標軌道は、 K_{di} を積分ゲインとして次式で生成される。

$$\theta_1^d = -K_{i1} \int (x - x^d) dt, \quad (5)$$

$$\theta_2^d = -K_{i2} \int (y - y^d) dt. \quad (6)$$

これは、ステップ状に与えた手先位置目標 (x^d, y^d) に対する偏差を解消しながら関節角の目標軌道を整形していることになる。以下では、上記の制御手法を基礎として、多関節ロボットの手

Fig. 2 A time history of impulsive load and the control algorithm proposed in this paper

先に衝撃的荷重負荷が加わったときの振動的挙動を抑制するアルゴリズムを提案し、荷重解放後の自律的な復帰動作が極めて容易に実現可能であることを明らかにする。また、上記の制御則に少しの工夫を加えるだけで、バネのような弾性要素の拮抗配置によるエネルギー最小規範を機構に持たないモータ駆動系においても適用可能であることを明確にする。

4. 衝撃的荷重負荷に対する安定姿勢と復帰動作を実現する制御アルゴリズム

本稿で提案する、ロボットの手先に加わる衝撃的荷重負荷に対する振動抑制手法と、荷重解放後の元姿勢への滑らかな復帰動作を実現するための制御アルゴリズムについて詳述する。まず、本手法を簡潔にまとめると、荷重印加時と解放時に以下の三つの操作を実行するのみである。

- 積分コントローラの休止 (負荷時)
- 微分ゲインの増大 (負荷時)
- 仮想目標軌道のゼロクリア (解放時)

具体的には Fig. 2 のように、前章で記述した関節角の仮想目標軌道を整形する積分コントローラを荷重印加時に休止し、加えてトルク入力生成する PD 制御部において微分ゲインのみを増大させるというアルゴリズムとなる。加えて、荷重解放時にはそれまでに休止している積分コントローラによって整形され一定値となっていた仮想目標軌道をゼロに更新する。以下では、前述したようにワイヤ拮抗駆動系とモータ駆動系に分けて数値解析を行い、提案アルゴリズムが駆動系に依存しない手法であることを示すことでその有用性を明らかにする。なお、本稿の数値解析においては四次の Runge-Kutta-Gill 法による連立微分方程式の解法を行っており、18 次元状態変数となるワイヤ拮抗駆動系の解析で制御周期を 200 μ s、六次元状態変数となるモータ駆動系で 1 ms としている。

4.1 ワイヤ拮抗駆動系の場合

本節では、ロボットを垂下姿勢から $(x^d, y^d, \theta_3^d) = (0.6 \text{ [m]}, 0 \text{ [m]}, 40^\circ)$ まで手先を移動した後、その手先に $-x$ 方向と $-y$ 方向にそれぞれ 40 N の負荷が生じた場合、提案制御アルゴリズムによるロボットの応答を検証する。ここで利用するのはワイヤ拮抗駆動系であり、上肢運動における屈曲動作を模擬するために第 3 関節の目標角を 40° としている。各時間ごとに与えたタスクは、手先が目標値に収束した 2 s の時点 (振り上

Table 1 Control parameters in antagonistic wire-driven arm

τ_{b1}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p1}	3.0	K_{d1}	0.5
τ_{b2}	$\tau_c + 1.0$ [Nm]	K_{p2}	2.0	K_{d2}	0.4
τ_{b3}	τ_c [Nm]	K_{p3}	2.0	K_{d3}	0.8
τ_c	0.5 [Nm]	K_{i1}	0.02	K_{i2}	0.04
θ_3^d	40 [°]

Fig. 3 A successful result of impact force absorption when an impulsive load is applied at the tip of the robot, where the external forces, i.e., 40 [N], are applied toward $-x$ and $-y$ axes respectively

げ期)で上記の衝撃的荷重負荷を加える(負荷発生期)。次に、4[s]の時点で負荷を解放し(負荷解放期)、6[s]の時点で元の振り上げ姿勢になるように復帰動作を行う(復帰動作期)。

各種の制御パラメータは**Table 1**のとおりであり、負荷印加時において積分コントローラを休止すると同時に微分ゲインを次式のように変更する。

$$K_{d1} = K_{d2} = K_{d3} = 1.2. \quad (7)$$

このときの結果を**Fig. 3**に示す。また、各時刻でのロボットの姿勢を**Fig. 3(e)**に示す。**Fig. 3(a), (b)**のように、振り上げ動作後の負荷印加時において x , y のいずれの方向についても衝撃的荷重負荷を顕著に吸収し、振動的挙動を見せることなく安定姿勢へと収束していることが分かる。このような手法を採らない場合**Fig. 4(a), (b)**に示したように、極めて大きな振動的挙動が現われ負荷印加後も手先の反動を抑えることができない。

Fig. 4 It shows a case of failure of impact force absorption. Responses of (a) and (b) appear when the integral-controller-hold process presented is not utilized at the time of impact. Responses of (c) and (d) occur due to PD-controller-hold without the integral-controller-hold process

い。他方、PD制御部(式(3))を直接停止することはそれまでの生成トルクを制御をかけないまま維持することに相当するため、**Fig. 4(c), (d)**のように振動的挙動がより顕著となり負荷が加わったまま大きな戻り動作を誘発し危険となり得る。また、非常停止の場合負荷印加時のロボットの姿勢を維持するようにブレーキをかけるか、すべての関節トルクをゼロにするなどの手法が考えられる。前者の場合衝撃力の緩和や吸収が困難となり、後者の場合ロボットに自由振動を生じさせることになり、ロボットの周囲への接触の危険が残る。このようなことから、ステップ状の手先負荷印加時のロボットの安定姿勢が「積分コントローラ休止」と「微分ゲインのみの増大」によって容易に実現できることが明らかとなる。

次に、負荷を解放した後の動作を検証する。本稿では**Fig. 2**のように負荷解放後も積分コントローラの休止を続けており、それと同時に比例制御部(式(3))内の仮想目標角 θ_i^d をいったんゼロに設定している。**Fig. 3(c), (d)**における点線が仮想目標角の時間軌道を示しており、負荷解放期においてゼロとなっていることが分かる。このような簡便な代入処理を負荷解放時に行うことでロボットの安定姿勢にかかわる二つの効果が生まれる。

まず、負荷解放時に現れる一つめの効果について述べる。本稿でのロボットの動作はヒトの上肢運動を模した振り上げ運動としており、このタスクにおいては式(5)、式(6)から分かるように両仮想目標軌道が正值となる。したがって、負荷解放時にゼロクリアをしなければ残存した正の目標軌道に向けて各関節が動き出すことになる。ゼロクリアによる効果は第2関節の応答において顕著である。つまり、**Fig. 3(d)**のように4[s]時

Fig. 5 A time history of impulsive load and the control algorithm in the case of iterative motion

点の目標角 ($\theta_2^d = 74.3^\circ$) がゼロとなることで、解放期において 15° 程度の反動に抑えることができています。一方で、第1関節においては Fig. 3 (c) から分かるように、4 [s] における目標角の修正が不十分となり比較的大きな反動を生じている。その結果、Fig. 3 (a) のように x 軌道の大きな反動を引き起こしている。そのようなことから、ゼロクリアではなく、負荷解放直前の各関節角を目標値に代入する方法が考えられる。他の手法も含めた反動抑制法を今後検討しなければならない。

次に、復帰動作期における動作と制御手法について述べる。ここでは、積分コントローラの休止を解除し、同時に変更していた微分ゲインを通常動作時の値に戻している。この操作のみによりロボットを元の姿勢（振り上げ姿勢）に復元している。ここで、前記した目標関節軌道のゼロクリアに関する二つめの効果について述べる。仮に、提案アルゴリズムのゼロクリアを実行しなければ積分コントローラの一般的な定常偏差特性により、式 (5)、式 (6) で整形される目標関節角が残存する値に重畳する形で増大する。その結果、式 (3) における制御入力指令が過大となり復帰動作は発散する。

また、前記したように Fig. 3 (c), (d) には、振り上げ期から復帰動作期までの第1関節と第2関節の時間軌道（実線）を示している。加えて、図内の点線は式 (5)、式 (6) で生成される仮想目標軌道である。負荷印加時において積分コントローラを休止していることから、2 [s]～4 [s] の目標軌道が振り上げ期の値のまま変化していないことが確認できる。また、全区間を通して目標軌道に関節角度が追従していないことが分かる。これは、関節変数に偏差が残ったとしても式 (3) から分かるように、比例制御部に残ったトルク成分が重力とつり合うために起こる。結果的に、手先位置が目標値に収束すればよく関節空間における収束性は要求されない。

最後に、荷重負荷の印加と復帰動作を繰り返す運動について記述する。Fig. 5 のように負荷が解消されたと同時に復帰動作に入る例であり、Fig. 6 にその結果を示す。結果から分かるように、振動的な挙動が起こることもなく約 2 [s] で手先軌道が安定し元の振り上げ姿勢に復帰している。ここで、 xy 軌道に注目すると重力方向となる y の応答が x に比較してより速く収束している。Fig. 6 (c), (d) の各関節角の軌道も収束が遅れてい

Fig. 6 An example of repetitive motion of the swing-up motion and vibration reduction motion. This successful recovery movement can be realized by only on/off swithing of the integral-controller-hold process

Table 2 Control parameters in motor-driven arm

τ_{b1}	0 [Nm]	K_{p1}	1.6	K_{d1}	1.2	K_{i1}	0.01
τ_{b2}	0 [Nm]	K_{p2}	5.0	K_{d2}	0.9	K_{i2}	0.003
τ_{b3}	2.1 [Nm]	K_{p3}	3.0	K_{d3}	0.2		

ることから、各試行の復帰動作終期において偏差がより大きい手先位置 x の軌道制御を各関節で行っていることが分かる。また、今までと同様に積分コントローラによって生成される目標角軌道が仮想的な指標であり、収束する必要のない値であることが Fig. 6 (c), (d) から理解できる。

4.2 モータ駆動系の場合

本節では、電動モータが各関節に直接配置されたモータ駆動系に対しても、本稿で提案している制御アルゴリズムがそのまま利用できることを明らかにする。ここでは、前節で検証した Fig. 2 のような一連の動作と同様の連続動作とし、振り上げ期から負荷発生期、解放期を経て復帰動作期に至るまでの時間応答を検証する。また、モータ駆動系に特化した制御パラメータは Table 2 のとおりであり、衝撃的荷重負荷が加わったときに微分ゲインを以下のように変更する。

$$K_{d1} = K_{d2} = 9.0, K_{d3} = 5.0. \quad (8)$$

Fig. 7 にその結果を示す。全体的に見てワイヤ拮抗駆動系と同様に、負荷による衝撃力を吸収しており、振動的挙動を抑止できていることが分かる。このようにモータ駆動系への適用に関しても提案アルゴリズムが上手く機能しており、まったく異なる両駆動系において汎用的に利用できることが明らかになった。

4.3 考察

4.3.1 安定性解析

本節では、非線形バネを有する拮抗駆動機構の安定性をリアプノフの方法により明らかにする。ここでは簡単のために、Fig. 8

Fig. 7 A successful result of impact force absorption when an impulsive load is applied at the tip of the robot in the case of a conventional motor-driven robotic arm

Fig. 8 Schematic illustration of the antagonistic mechanism with nonlinear springs

のような1関節アームの拮抗駆動系を例に検証する。本稿ではワイヤ拮抗駆動系に、変位量の3乗に比例する弾性エネルギーを有する非線形バネを拮抗配置している。よって、プーリ半径を R 、バネ定数を k 、バネ自然長からの初期伸びを Δx_0 、初期の伸び状態からさらに緊張させたときの伸び量を Δx_1 , Δx_2 とすると、非線形バネによって生じる弾性エネルギーは次式となる[26]。

$$P = \frac{1}{2}k(\Delta x_0 + \Delta x_1 - R\theta)^3 + \frac{1}{2}k(\Delta x_0 + \Delta x_2 + R\theta)^3. \quad (9)$$

上式を関節角に対して2回偏微分することで、次式のような関節角に対する等価回転剛性が得られる。

$$K_{eq} = 3kR^2(2\Delta x_0 + \Delta x_1 + \Delta x_2). \quad (10)$$

なお、等価剛性の導出は非線形弾性力を有する物理要素におい

て有効であり、半球型柔軟指の弾性モデルを導いた先行研究[28]において指先最大変位に対する等価剛性が実験的に示されている。次に、式(10)を用いるとFig. 8の1関節回転機構の運動方程式は次式となる。

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mg \sin \theta + K_{eq}\theta = 0. \quad (11)$$

ここで、リンク慣性モーメントを I 、重量を m 、関節粘性を c としている。さらに、状態変数を $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$ と定義すると、上式は以下の状態方程式に変換される。

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = -px_2 - qx_1 - r \sin x_1. \quad (13)$$

上式において、 $p = -c/I$, $q = -K_{eq}/I$, $r = -mg/I$ と置換した。ここで、次式のようなリアプノフ関数を考える。

$$V(x) = \frac{q}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + r \int_0^{x_1} \sin z \, dz. \quad (14)$$

ここで、 $V(0) = 0$, $V(x) > 0$ ($x \neq 0$) より上式は明らかに正定関数である。続けて、上式を解軌道に沿って時間微分すると、次式を得る。

$$\dot{V}(x) = -px_2^2. \quad (15)$$

ここで、上式は準不定であるが $x_1 = x_2 = 0$ 以外で恒等的にゼロになることはない。したがって、非線形バネを有する拮抗駆動システムにおける平衡点は漸近安定である。ただし、前記したように本解析は1関節の非線形バネ拮抗機構に限定しているため厳密な安定性とは言えないが、3関節機構に拡張したときの指針になると考えられる。

4.3.2 振動抑制効果と微分ゲイン決定法

次に、提案アルゴリズムである微分ゲイン増大による振動抑制効果をロボット手先位置に関する位相面解析により確認する。Fig. 3の解析における衝撃荷重負荷時の2[s]~4[s]での位相面を図示すると**Fig. 9**(a), (b)となる。図において実線と点線の差異は微分ゲイン増大の実行の有無のみである。結果から明らかに、手先座標のいずれにおいても微分ゲイン増大により振動的挙動が顕著に抑制され、Fig. 3(e)に示す荷重負荷後の姿勢となる平衡点に指数減衰を示しつつ到達している。加えて、位相面を観察することで微分ゲイン決定の指針とすることも可能である。すなわち、Fig. 9(c)のように手先座標を合わせた解軌道を定義し、原点(平衡点)までの2乗距離を次式のように導入する。

$$L^2 = (x + y)^2 + (\dot{x} + \dot{y})^2. \quad (16)$$

続けて、ロボット動作中の各時刻ごとの2乗距離の総和 $\sum_{t=0}^{\infty} L^2$ が最小になるように微分ゲインを決定すればよい。ただし、本手法ではロボットの閉ループダイナミクスから手先座標の時間応答を求め、式(16)が解析的に導出されなければならない。一方で、非線形性が強く多変数となるシステムにおいては解析解が求まらないことが多い。その場合、実動作の数値解析に極小値探索アルゴリズムを組み入れることで実現できると考えられる。これらのゲイン決定手法と衝撃的荷重の負荷直後の衝撃緩和手法の開発は今後の課題としたい。

Fig. 9 This phase plane analysis shows improved responses of the tip position of the robot. It is clearly indicated that the oscillatory motion can be extremely refined by the increase of differential gains for each joint

Fig. 10 Comparative examples of collision responses obtained when the sampling period is set to 40 [ms] and 60 [ms]

4.3.3 サンプル周期による影響

ロボット制御系のサンプリング周期（制御周期）の長短がその安定性に大きく影響することは周知の事実である．そこで本節では，サンプリング周期の違いに対する荷重負荷時の応答を観察することで，提案アルゴリズムの有効性を明らかにする．ここでも同様に，Fig. 3 の解析における衝撃的荷重負荷時に注目し，式 (3) の PD 制御部の制御周期を故意に遅らせた手先座標の応答を **Fig. 10** に示す．この解析では，制御周期を 40 [ms]，および 60 [ms] まで遅らせている．結果から明らかなように，40 [ms] の遅れまでは滑らかな手先軌道となっており，仮想目標軌道整形休止と微分ゲイン増大の組み合わせによる振動抑制効果が現れている．一方で，60 [ms] の遅れでは不規則振動が見受けられ，制御周期の最大許容遅れと判断される．一般的なロボット制御系では，このような大幅な制御遅れは致命的な挙動につながる．それにもかかわらず 40 [ms] の遅れでも成功した理由は，提案手法が衝撃による外力や関節モーメントの計測を必要としないアルゴリズムであるためと考えられる．他言すると，身体運動における「脱力」を行うことでゆっくりとした運動制御にも対応できるものと考えている．

Fig. 11 This result shows comparisons of tip position, which are obtained in the case of high and low loads, respectively

4.3.4 高荷重に対する有効性

本節では，提案手法の有効性を定量的に示すために，4.1 節と同様にロボット手先の xy 負方向にそれぞれ 180 [N]，240 [N] の高荷重を加える．ここで，微分ゲインを式 (7) から以下のように変更する．

$$K_{d1} = K_{d2} = K_{d3} = 3.8. \quad (17)$$

このときの手先座標の時間応答を **Fig. 11** に示す．図内には比較のために，Fig. 3 (a)，(b) の結果を示し低荷重と定義して．結果から分かるようにより大きな振動抑制効果が現われ，低荷重時にわずかに残存していた揺れも生じていない．また，軌道の傾きとなる手先戻り速度が高荷重時に大きくなっていることから，微分ゲイン増大による減衰力が大きくなっているにもかかわらず，高荷重衝突に対して逆らうことなく動作を生成しているものと考えられる．加えて，安定姿勢への速応性が向上していることから，提案手法が高荷重負荷に対しても有効に機能することが明らかになった．

5. 結 言

本稿では，先行研究 [26] において提案したロボットの手先位置制御則を基礎として，仮想目標角を整形する積分コントローラを休止し微分ゲインのみを変更することによって，ロボットの手先に衝撃的荷重負荷が加わったときの振動的挙動と反動を抑止しロボットの姿勢安定を実現する制御アルゴリズムを提案した．また，200 [N] 前後の高荷重が手先に加わる場合であっても各関節への減衰力に寄与する微分ゲインを単純かつ一律に増大させることで，高い振動抑制効果と反動のない挙動を実現できることが明らかになった．本手法では，従来の非常停止や生成トルクをゼロにすることは不要で，負荷解放後のロボットの復帰動作まで制御の流れを止めることなく連続動作を実現できる．また，負荷解放直後に復帰動作を要求しない場合においても本手法は対応でき，人とロボットとの接触が想定される共存社会や協調作業においてロボットを完全停止させない有用な制御手法と考える．また，提案手法は各関節周りにワイヤを拮抗的に配した駆動系を有するロボット機構に加えて，電動モータを各関節に配置した駆動系を有する従来のロボット機構にも適用可能であることを明らかにした．

加えて，本手法はロボットの通常動作時の制御則における一部の休止や再始動によって衝撃力を緩和し安定姿勢を実現しているものであり，衝突時の関節トルク変化や手先外力のセンシ

Fig. 12 A continuous line shown in (a) exhibits a fatal divergence of control input u_2 when both of the biased torques are set as $\tau_{b1} = \tau_{b2} = \tau_c$; the dotted line indicates the successful result shown in Fig. 3

ングを必要としない。すなわち、本手法の適用は物体との衝突前でも可能であり、衝突を予測することによって衝突時の撃力吸収の成否に決定的要因となり得るサンプリング周期に基づく時間遅れの影響を回避できるものと考えられる。そのようなことから、今後の課題は実機による制御アルゴリズムの検証であり、静電容量型の近接センサとタッチセンサの併用による接触前検知やロボットビジョンによる接触予測を行い、提案アルゴリズムとの組み合わせによる検証が必要であると考えられる。

謝 辞 本研究の一部は、科研費基盤研究 A (15H02230), JKA 補助事業 (26-144, 27-146), ならびに本学競争的資金 (H27 年度特別研究費) を受けて行われたものである。また、本論文の査読にあたり提案アルゴリズムの有用性や文章構成に関して有意義な指摘をいただいた。その結果新たな知見も得られた。ここに感謝の意を表します。

付録 A. バイアストルクの決定過程とその効果

生体模倣という観点から近年多く見受けられる、ワイヤや糸を引っ張ることにより関節を駆動するロボットシステムにおいては、その緩みやたわみを解消しなければならない。通常は制御入力にそのまま力やトルクとして足し合わせるが、本稿では 3 章において τ_c と定義している。加えて、第 1, 2 関節の屈曲側制御入力 u_1, u_2 に足し合わせるトルクをバイアストルクと定義し、 $\tau_{b1} = \tau_{b2} = \tau_c + 1.0$ [Nm] としている。このように決定した値は試行錯誤により求めたものであり、その効果を示すために $\tau_{b1} = \tau_{b2} = \tau_c$ として数値解析を行った場合の結果を **Fig. 12** に示す。

Fig. 12(a) から分かるように、負荷の解放時の 4 [s] において第 2 リンクの関節を屈曲させる制御入力トルク u_2 が長時間に渡って負値となる。これはワイヤを巻く動作とは反対に、能動的に解く動作が続くことになり制御が不可能になり発散する結果をもたらす。この u_2 の「誤動作」を起点として、 u_1 も正側に発散する結果となる。本稿では結局のところ、 $\tau_{bi} = \tau_c + 1.0$ における 1.0 [Nm] はシミュレーション過程で試行錯誤的に決定している。この追加トルクはロボットの自重補償のためのフィードフォワード項に近い意味を持つと推察され、制御性能に大きな影響を与えていると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 2025 年の人間とロボットが共存する社会に向けて次世代ロボットビジョン懇談会報告書, 経済産業省製造産業局, 2004.
- [2] 山田: “次世代ロボット安全: 技術の現状と課題”, *Panasonic Technical Journal*, vol.58, no.4, pp.33–38, 2013.
- [3] 田村, 浅間: “サービスロボット: 人間・ロボット共存環境におけるサービスロボットの振る舞い”, *精密工学会誌*, vol.78, no.8, pp.666–669, 2012.
- [4] Y. Zheng and H. Hemami: “Mathematical Modeling of a Robot Collision with its Environment,” *Journal of Robotic Systems*, vol.2, no.3, pp.289–307, 1985.
- [5] 吉田, 指田, 梅谷: “拡張逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化”, *日本ロボット学会誌*, vol.11, no.3, pp.410–418, 1993.
- [6] 立矢, 辻村, 江端, 茶谷: “ロボット機構の特性評価と比較 (第 1 報 静力学特性に関する評価と比較)”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.59, no.559, pp.304–310, 1993.
- [7] 立矢, 浦野, 茶谷, 放生: “ロボット機構の特性評価と比較 (第 2 報 衝撃荷重を受けるロボット機構の評価)”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.62, no.598, pp.2395–2402, 1996.
- [8] 吉田, C. Mavroidis, S. Dubowsky: “衝突時に関節運動を生じるマニピュレータの衝撃力学の定式化と同定”, *日本ロボット学会誌*, vol.16, no.1, pp.110–117, 1998.
- [9] 鄭, 高橋, 庄司, 中野: “緩衝機能を有する衝突検知システムを用いたマニピュレータの危害力の低減”, *日本ロボット学会誌*, vol.23, no.8, pp.949–956, 2005.
- [10] 中村, 嵯峨, 中沢, 河村: “機能性流体を用いた柔軟関節マニピュレータの開発”, *計測自動制御学会論文集*, vol.40, no.10, pp.1060–1066, 2004.
- [11] 中村: “対人衝突時に安全確保が可能なマニピュレータの開発”, *油空圧技術*, vol.45, no.11, pp.35–40, 2006.
- [12] 生田, 野方: “福祉ロボットの安全性に関する統一の評価法の提案”, *日本ロボット学会誌*, vol.17, no.3, pp.363–370, 1999.
- [13] 池田, 斎藤: “人間協調型ロボットの本質的安全設計手法と安全設計指標の提案”, *産業安全研究所特別研究報告*, vol.33, pp.5–13, 2005.
- [14] 森田, 鈴木, 川崎, 菅野: “人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御”, *日本ロボット学会誌*, vol.16, no.1, pp.102–109, 1998.
- [15] N. Hogan: “Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control,” *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1047–1054, 1987.
- [16] K. Toumi and D. Guts: “Impact and Force Control,” *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.410–416, 1989.
- [17] R. Volpe and P. Khosla: “Experimental Verification of a Strategy for Impact Control,” *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1854–1860, 1991.
- [18] A.D. Luca, A. Albu-Schäffer, S. Haddadin and G. Hirzinger: “Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm,” *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp.1623–1630, 2006.
- [19] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A.D. Luca and G. Hirzinger: “Collision Detection and Reaction: A Contribution to Safe Physical Human-Robot Interaction,” *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp.3356–3363, 2008.
- [20] 福田, 和田, 松浦, 新井, 渡辺, 正司: “衝突を含むロボット・マニピュレータの安定制御—第 3 報—”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.57, no.541, pp.2953–2958, 1991.
- [21] 正司, 稲葉, 福田, 細貝: “衝突を含むロボット・マニピュレータの安定制御—第 4 報—”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.57, no.543, pp.3592–3598, 1991.
- [22] 正司, 稲葉, 福田, 細貝: “衝突を含む冗長系多リンクマニピュレータの位置決め安定制御”, *計測自動制御学会論文集*, vol.28, no.2, pp.264–272, 1992.
- [23] 正司, 稲葉, 福田: “衝突を含むロボットマニピュレータの統一的アプローチに基づく安定制御”, *日本ロボット学会誌*, vol.11, no.5, pp.677–692, 1993.

- [24] 小菅, 松本, 盛永: “適応制御を利用したマニピュレータの衝突検出”, 計測自動制御学会論文集, vol.39, no.6, pp.552–558, 2003.
- [25] 澤田: “イノベーション過程に基づく 1 リンク柔軟アームの衝突発生検知と停止制御”, システム制御情報学会論文誌, vol.19, no.6, pp.250–261, 2006.
- [26] 井上, 加藤, 平井: “バックドライバビリティを有する拮抗腱駆動冗長関節ロボットの重力下での振り上げ到達運動”, 日本ロボット学会

誌, vol.31, no.1, pp.83–88, 2013.

- [27] 井上, 平井: “2 リンクアームにおける逆運動学を利用しない手先位置制御”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.3, pp.307–315, 2014.
- [28] T. Inoue and S. Hirai: “Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-fingered Manipulation,” IEEE Trans. Robotics, vol.22, no.6, pp.1273–1279, 2006.

井上貴浩 (Takahiro Inoue)

1995 年同志社大学工学部機械工学科中途退学。2006 年立命館大学理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程修了。2007 年岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科助教, 2009 年 10 月より准教授となり現在に至る。その間, 人間情報工学科に名称変更。2002 年日本機械学会畠山賞。2005 年, 2006 年 ICRA Best Manipulation Paper Award Finalist。2005 年 IEEE 関西支部学生研究奨励賞。2007 年ロボティクスシンポジウム最優秀論文賞。同年, 計測自動制御学会 SI 部門研究奨励賞。2008 年ロボット学会論文賞, ならびに研究奨励賞受賞。柔軟指ハンドリング, ヒトのような視覚遅れ系における操り戦略に関する研究に従事。バイオメカトロニクスに基礎を置いたヒト運動制御機能のロボットへの適用に関する研究に興味を持つ。IEEE, 電子情報通信学会, ならびに日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)

宮田龍一 (Ryuichi Miyata)

岡山県立大学情報系工学研究科博士前期課程在籍。上肢リーチング運動での運動制御メカニズムの解明とロボットへの実装に関する研究に従事。日本機械学会学生員。

植田尊大 (Takahiro Ueda)

岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科在籍。上肢多関節アームでの衝撃力緩和手法と数値計算手法に関する研究に従事。日本機械学会学生員。

佐藤克樹 (Katsuki Sato)

岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科在籍。上肢多関節アームの設計と制御に関する研究に従事。日本機械学会学生員。

平井慎一 (Shinichi Hirai)

1990 年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995 年同助教授。1996 年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授, 2002 年同教授となり, 現在に至る。1989 年米国マサチューセッツ工科大学客員研究員。1990 年度計測自動制御学会論文賞。1996 年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞。2001 年 IEEE ICRA Best Automation Paper Award Finalist。2005 年, 2006 年 IEEE ICRA Best Manipulation Paper Award Finalist。2006 年 IEEE ICRA Best Vision Paper Award Finalist。2008 年日本ロボット学会論文賞。2011 年 IEEE ROBIO T. J. Tarn Best Paper in Robotics Finalist。2006 年～2010 年 IEEE Transactions on Robotics Associate Editor。柔軟指操作, 生体組織モデリング, テンセグリティロボット, 柔軟物操作などの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)