フィードバック制御シミュレーションを用いた多体システムの動作生成
(複数の拘束条件を持つ場合)和地 天平^{*1}, 田川 泰敬^{*2}Motion planning of multi body robots using feedback control simulation
(In the case of multiple physical constrains)Tempei WACHI^{*1} and Yasutaka TAGAWA^{*2}^{*1, *2} Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-15 Nakachou, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan

Received: 20 October 2016; Revised: 6 December 2016; Accepted: 22 January 2017

Abstract

Recently, robots with high degree-of-freedom (DOF) have been used widely in various fields. These robots are able to conduct multiple purposes such as obstacle avoidance, postural control, trajectory tracking, etc. simultaneously using their redundancy. Hence, various motion generation methods are proposed for such robots. However, many conventional methods use the pseudo-inverse and null-space of the Jacobian matrix. Then the dedicated evaluation indexes are needed to solve the redundancy. These processes generally require the advanced expertise. Meanwhile, methods using configuration space have been utilized for a long time. However, these methods require enormous computation since the methods use iterative calculation. Recently, "virtual spring-damper hypothesis" was proposed as the motion generation method without using the expertise and iterative calculation for high redundant systems. In this method, the end-effector of the robot arm and reference point is connected by the virtual spring and damper in simulation space. The dynamic motion simulation is performed, then, from the simulation result, reference motion of the real robot arm is obtained. In this paper, a method that extends the virtual spring-damper hypothesis is proposed. In the proposed method, the virtual external force and torque are used to satisfy multiple constrains. Then, the effectiveness of the method is confirmed through several numerical simulations.

Key words : Multi-body dynamics, Motion planning, Feed-back control simulation, Multi-link robot**1. 緒 言**

近年のロボットは多自由度化が進み、冗長性の高いものが利用されるようになってきている。高い自由度を持つロボットは、その冗長性を利用することで、障害物の回避や重心位置の制御といった、複数の要求を満たした動作が可能になる。しかしその一方で、動作の生成そのものが課題となっている。冗長性を持つロボットは、動作目標を与えられたとき、目標を達成できる動作が無数に存在する。そのため、一般的に逆運動学の解が一意に定まらない。これは逆運動学の不良設定問題として知られ、動作生成を難しくする一因となっている。

高冗長性を持つ多関節ロボットに対する動作の生成手法としてこれまでに数多くの手法が提案されている(Whitney, 1969)(Liegeois, 1977)(Yoshikawa, 1985)(Nakamura, 1991)(Hollerbach and Suh, 1987)(Khatib, 1987)。これらの手法は、大まかに運動学的アプローチと動力学的アプローチに分類できる。どちらのアプローチでもヤコビ行列の疑似逆行列(Whitney, 1969)を導入し、その零空間を特定の評価指標によって最適になるように決定することで、冗長性を解決する(Liegeois, 1977)。運動学的アプローチでは、可操作性(Yoshikawa, 1985)や、障害物回避(Nakamura, 1991)、等が評価指標として利用され、ロボットの動作は関節角速度レベルで最適化される。また、動力学的アプローチでは、トルクの二乗和(Hollerbach and Suh, 1987)や、運度エネルギー(Khatib, 1987)などが評価指標となり、

No.16-00495 [DOI:10.1299/transjsme.16-00495], J-STAGE Advance Publication date: 30 January, 2017

^{*1} 正員, 東京農工大学 工学府 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-15)^{*2} 正員, フェロー, 東京農工大学 工学府

E-mail of corresponding author: s14861lx@st.go.tuat.ac.jp

ロボット動作は関節角加速度レベルで最適化される．また，幾何学的アプローチとして，コンフィギュレーション空間を用いた手法も古くから利用されている(Russell, 2008)(近藤, 1989)(平岡, 1994)．コンフィギュレーション空間とはロボットの各関節角度を座標軸として定義された空間であり，空間上の点はロボットの姿勢と対応し，実空間でロボットが取りえない姿勢をコンフィギュレーション障害物として内包している．コンフィギュレーション障害物を避けながら初期姿勢と目標姿勢をつなぐ軌跡を生成することでそれを動作とする．軌跡の生成にはポテンシャル法(Khatib, 1986)(Yashiro, 2014)やルート探索(鈴木他, 2005)(野見山他, 2007)が利用される．ヤコビ行列を利用する手法は，疑似逆行列や零空間の導出，適切な評価指標の設定といった手順が必要になる．これらの導出や設定には高度な専門性が必要となる．また，末端部の軌跡などをあらかじめ設定しておく必要がある．さらに，動作の拘束条件が増えると，動作の切り分けや評価指標の設定が困難になっていく．コンフィギュレーション空間を利用する手法では，コンフィギュレーション障害物の重ね合わせができるため，複数の動作条件を守ることは容易である．しかしコンフィギュレーション空間の生成や経路探索において反復計算が必要であり，リアルタイムでの動作生成や，高自由度の対象には適用しにくいといった欠点がある．このような背景から，専門性や高い計算能力を必要とせず，単純で扱いやすい動作生成の手法が必要とされている．本論文では，複雑な多体システムに対して，反復計算を必要とせず，かつ直感的に動作の拘束条件を付与することのできる動作生成手法の開発を目的とする．

2.では提案手法の概要について述べる．3.では，多体システムの基本構造である，連続チェーン構造，ツリー構造，および閉ループ構造に対して提案手法を適用し，実際に動作の生成を行い，有効性を検証する．4.では結論を述べる．

2. 提案手法

ロボットに代表される多体システムの動作生成手法では，手法を導入する上での専門性の必要性や，一定以上の演算能力を動作生成対象に求めることが課題となっていた．膨大な反復計算や，特殊な指標の設定を必要としないシンプルな手法として，「仮想バネ・ダンパ仮説」が有本らによって提案されている(Arimoto et al., 2005a, 2005b)．この手法は，対象となるロボットアームの順ダイナミクスモデルを用意し，仮想空間上でアーム先端(以下，“手先”と呼ぶ)と手先の目標位置をバネとダンパによって接続する．この仮想空間上でのシミュレーション動作の結果を，実際のロボットの目標動作として利用する．同手法は，関本らによって実験でその有効性が確認されている(関本, 有本, 2007)．この手法では，モデルを動作させるために仮想的な外力を利用していたが，本論文ではそれを拡張し，種々の動作の拘束にも仮想外力を用いることで，複数の拘束条件下でも高効率に動作を生成する手法を提案する．図1に手法の模式図を示す

Fig. 1 Overview of the proposed motion generation method. The left figure represent the simulation space. The robot model is moved under the virtual external force, such as repulsive force from the obstacle and attractive force from the target position in simulation. The right figure represents real space. The real robot traces the motion of the simulation results in real space.

図 1 左の青破線枠内は、仮想空間上のロボットアームの順ダイナミクスモデルを示している。ロボットのモデルは手先に目標位置方向への仮想外力を受けることで、目標位置まで移動する。その際、障害物にロボットが接近した場合、反発力がロボットに加わるようにすることでロボットは障害物を避けた動作をする。図 1 右赤破線枠内で示されている実際のロボットは、動作シミュレーションの結果を動作の目標値とすることで、障害物を避けた動作を実現する。また、動作シミュレーションの結果を利用することで、動作生成プロセスでの反復計算が不要になる。このような外力による動作の拘束を、障害物回避の他に、関節の角度や角速度、角加速度といったハードウェアの持つ制約や、自身との接触回避、転倒回避といった様々な拘束条件に対して外力による拘束を行うことで、複雑な拘束条件を持つ動作を実現する。また、文献(関本, 有本, 2007)の手法では仮想的な外力のみを用いていたが、関節レベルでの拘束条件の付与を容易にするために、本論文では外力トルクも用いる。例えば関節角度や角速度が上限に近づいた場合、反発トルクが関節に加わる。図 2 に動作生成アルゴリズムのブロック線図を示す。図中の P_s は動作生成対象の順ダイナミクスモデル、 C_s は仮想バネや仮想ダンパに相当するフィードバック制御器を示している。Restriction condition ブロックは、動作の拘束条件を定義したブロックであり、ロボットが拘束条件を外れそうになった場合、反発力や反発トルクを仮想外力として生成する。 P_s は外力や外力トルクによって動作を制限された状態でフィードバック制御を受ける。 P_s のフィードバック制御シミュレーションの結果が、実空間の対象の目標動作になる。

前述の“仮想バネ・ダンパ仮説”では冗長性の解決のみが行われていたが、提案する手法ではさらに動作の拘束条件の付与を可能とする。また、1. の背景で紹介した手法では困難であった、幾何学的拘束条件と動力学的拘束条件を同時に考慮することや、関節単位での拘束条件とロボット全体に対する拘束条件を同時に考慮した動作を生成することなどが可能となる。3. のシミュレーションによって、その可能性を検証する。

Fig. 2 Block diagram of the motion generation method using control simulation. r denotes the original target position of the end-effector. P_s is a dynamic model of the robot and C_s is a feedback controller. θ_r is the joint angle vector which satisfies multiple constraints given by the restriction condition block. When the motion is approaching the boundary of the restriction conditions, the reverse direction force and torque are generated by the restriction condition block.

3. シミュレーションによる検証

提案する手法を検証するために、実際に動作生成のシミュレーションを行った。様々な対象で検証を行うために、ダイナミクスモデルには分割されたモデル(Wachi et al., 2014)を利用した。このモデルは、1 関節と 1 リンクをモデル化したものであり、反力や加速度をお互いの拘束条件とすることによってモデル同士を連結することができる。モデルの連結によって様々な形状の多関節ロボットの表現が可能になる。本シミュレーションでは多体システムの稿本構造である、連続チェーンモデル、ツリーモデルに対して、それぞれに複数の拘束条件を与えて動作生成を行った。また、ツリーモデルのアーム先端位置の拘束によって、閉ループモデルが再現可能であることを検証した。

3・1 連続チェーンモデルでの動作生成

3・1・1 動作生成対象

提案手法を検証するために、はじめに、連続チェーンのロボットアームに対して、アーム先端(以下、“手先”と呼ぶ)位置を目標位置まで移動させる動作の生成を行った。また、複数の拘束条件が付与できることを確認するために、手先位置目標の他に転倒を回避するための重心位置の拘束を、新たな拘束条件として付与する。動作生成対象となる、連続チェーンロボットとして、図 3(a)に示す 3 自由度のロボットアームを想定した。ロボットアームは、地面に固定されていない台座に取り付けられており、図 3(b)に示すように、姿勢によって転倒する可能性があるものとする。簡単化のために、全てのリンクには同一のパラメータを与えた。リンクのパラメータを表 1 に示す。

Fig. 3 Series chain structure robot for motion planning. This robot arm is fixed to a base plate as shown in Figure 3(a), however the pedestal is not fixed on the ground. Therefore, it can easily fall down depending on the posture as shown in Figure 3(b).

Table 1 Parameters of link

Mass	1 [kg]
Length	1 [m]
position of center of gravity	0.5 [m]
Moment of inertia	1 [kg·m ²]

3・1・2 ロボットアームの動作目標

ここでは、以下に示す二つの条件を同時に満たす動作を生成する。また、各条件の模式図を図 4(a)および図 4(b)に示す。

(i) 手先位置の移動

ロボットアームの手先の座標を、図 4(a)中の赤点で示す初期座標 $A(0,3)$ から、目標座標 $B(-1,0)$ まで動かすことを動作の目標とする。このとき、動作中の手先の軌跡は設定せず、制約条件を満たしながら目標座標 B まで到達することで目標達成とする。

(ii) 重心位置の拘束

図 4(b)中の紫の点は、ロボットアームの重心位置を示している。転倒を回避するために、重心位置の x 座標を台座の幅の範囲に拘束した。重心が移動できる範囲は図 4(b)中の点線で挟まれた範囲のみとなり、それを動作の拘束条件とする。

Fig. 4 Operation target and restriction condition. In Figure 4(a), red point A represents the start position of end-effector (hand position), and green point B represents the target point of hand position. The operation target is to move the hand position from the point A to point B. In Figure 4(b), the magenta point represents the position of center of gravity of the whole robot arm. The restriction condition is to restrict the center of gravity position within the width of the base plate.

3・1・3 仮想外力の計算

各拘束条件に対する仮想的な外力の計算方法を以下に示す.

(i) 手先位置の制御

手先位置の制御には, 仮想バネ・ダンパ仮説に基づいて目標位置方向への外力を加えた. 仮想バネ・ダンパ仮説では, 初期姿勢時にバネが伸びた状態にあるため, 初期入力外力が大きくなってしまいう問題がある. 文献(関本, 2007)では, 可変バネ・ダンパを用いることで初期の外力入力が大きくなることを回避していた. 本論文内では, 目標地点を変動させることで, 初期外力入力が大きくなることを回避する. 図 5 に制御の概要を示す.

Fig. 5 End-effector position control. Blue circle is the circle whose center is point B. Blue point C on the blue circle is a current reference point which has the shortest distance from the end-effector. F_{ex} is external force applied to the end-effector, and it moves the end-effector to point C. r indicates the radius of the blue circle, and gradually decreases to zero.

最終的な目標点 B を中心とする円弧を定義し, 円弧と手先位置との距離が最短となる点を, 動作中の目標点 C とする. 円弧の初期半径 r_0 は初期点 A と目標点 B の距離に等しく, 半径を最終的に 0 にすることで, 動作中

の目標点 C と最終的な目標点 B が重なる．シミュレーション開始時，手先は円弧状にあるため初期偏差は 0 となり，初期外力入力も 0 になる．本シミュレーションでは，円弧半径は 10 秒間で 0 になるように与えた．半径の変動量は 5 次多項式による補間によって定義した．使用した式を式(1)に示す．

$$r = r_0 - r_0 \left\{ 6 \left(\frac{t}{t_{ed}} \right)^5 - 15 \left(\frac{t}{t_{ed}} \right)^4 + 10 \left(\frac{t}{t_{ed}} \right)^3 \right\} \quad (1)$$

式中の r は円弧の半径， t は時間， t_{ed} は最終時間を示している．この式は，始点と終点の加速度が 0 になる曲線を描き，滑らかな操作量を得たいときなどに利用される．

(ii) 重心位置の拘束

重心位置の拘束は，ポテンシャル法(Khatib,1986)(Yashiro,2014)に基づいて行う．重心位置が拘束領域の境界に近づいた場合，ポテンシャル法によって計算された反発力がアームに加わることで重心位置を逆方向へ動かす．使用した分割モデルは，関節部に力を入力することができるモデルであるため，反発力は関節部に加えた．また，多体システムは一つのリンクに対して外力を加えても重心の位置を制御できないため，全ての関節に対して反発力を加えた．外力付与の模式図を図 6 に示す．また，使用したポテンシャル関数を式(2)に示す．

Fig. 6 Restriction of the center of gravity position. Magenta point represents the center of gravity of the whole robot arm, and black dashed lines represent motion boundaries of the center of gravity. F_{exh} represents virtual external force which keeps the center of gravity position between the two dashed lines. When the center of gravity is approaching the boundaries (dashed lines), the reverse direction force is applied to the robot joints.

$$H = Ae^{\alpha(G_x - G_{x\lim})} + Ae^{-\alpha(G_x + G_{x\lim})} \quad (2)$$

式(2)中の A はポテンシャル高さの最大値を示している．また， α はポテンシャル場の勾配を示している． G_x は重心の x 座標を， $G_{x\lim}$ は G_x の変域の上限を示している．本シミュレーションでは，計算が発散することを防ぐために，境界上のポテンシャル勾配が有限になる関数を使用した．また，重心の移動速度が増大することを防ぐために，仮想的な減衰を与えた．実際にロボットが受ける外力は以下の式(3)に示す形になる．

$$F_{exh} = A\alpha e^{\alpha(G_x - G_{x\lim})} - A\alpha e^{-\alpha(G_x + G_{x\lim})} - C_g \dot{G}_x \quad (3)$$

式(3)は式(2)を G_x で微分したものに、仮想的な減衰力を加えたものである。式(3)中の C_g は仮想的な減衰係数を示している。本シミュレーションでの A , α , および C_g は、試行錯誤的に値を決定した。各パラメータの初期値を 1 とし、徐々に増加させながら最適な値を求めている。パラメータの決定は、 K_v , C_v , A , α , C_g の順で行った。シミュレーションで使用したパラメータを、表 2 に示す。また、表 2 中の K_v および C_v はそれぞれ仮想バネ・ダンパのバネ係数と減衰係数を示している。

Table 2 Parameters of simulation

K_v	C_v	A	α	C_g
30 [N/m]	15 [Ns/m]	1	10	10[Ns/m]

3・1・4 ロボットアームの動作生成結果と考察

シミュレーションによって生成された動作を図 7(a)に示す。また、比較のために幾何学的アプローチであるコンフィギュレーション空間を用いて動作を生成した結果を図 7(b)に示す。図 7(a),(b)中の太線はロボットアームを示しており、色が濃くなるほど終点に近い時刻の姿勢を示している。赤い点は手先の初期位置、緑の点は手先の目標位置、赤い破線は重心を拘束した領域の境界をそれぞれ示している。青い破線は手先の軌跡、紫の実線は重心位置の軌跡を示している。二つの結果から、どちらも重心位置を拘束領域に収めたまま、手先を目標位置まで移動させる動作の生成に成功した。

Fig.7 Simulation result of motion generation. Figure 7 (a) represents the result of proposed method, and Figure 7 (b) represents the result of using configuration space method. The black solid lines show the posture of the robot arm. Darker color indicates more recent posture. The red point represents the initial position of the end-effector (hand), and green point represents the target (final) position of the hand. The blue dashed line indicates the trajectory of the hand. The magenta solid line indicates the trajectory of the center of gravity. The red dashed lines indicate the boundaries of center of gravity position. These figures show that the hand can reach the target point, and also the center of gravity is kept in the restriction area in both results.

続いて、各結果の関節角度時刻歴とその時に必要となる関節トルク時刻歴の比較を行う。まず、各関節角度、関節トルクの定義を図 8 に示す。また、関節角度時刻歴を図 9(a),(b)、関節トルク時刻歴を図 10(a),(b)に示す。ただし、関節トルク時刻歴は、重力に対して姿勢を維持するための要素が最大となってしまう、ダイナミクスを考慮した影響が確認しにくくなってしまう。そのため、提案手法の有効性を確認しやすくするために、重力による影響を排除したものを示す。それぞれの時刻歴応答は図 7 と同様に(a)が提案手法によって生成した動作の結果、(b)がコンフィギュレーション空間を利用して生成した動作の結果を示している。

Fig.8 Coordinates of robot arm. Each joint angle is defined as θ_1 , θ_2 and θ_3 in sequence from the base plate. Each joint torque is defined as τ_1 , τ_2 and τ_3 in the same manner.

Fig.9 Time history of joint angles. Figure 9 (a) shows the result of proposed method, and Figure 9 (b) shows the result of using configuration space method. Each joint angle is defined as θ_1 , θ_2 and θ_3 in sequence from the base plate as shown in Fig.8.

Fig.10 Time history of joint torques. Figure 10 (a) shows the result of proposed method, and Figure 10 (b) shows the result of using configuration space method. Each joint torque is defined as τ_1 , τ_2 and τ_3 in sequence from the base plate as shown in Fig.8.

図 9 の関節角度時刻歴の比較を見ると、特に θ_3 の動作が大きく異なっていることがわかる。これは、提案手法では手先に外力を加えて動作させることで、手先の軌跡が最短に近づくような動作が生成されるのに対し、コンフィギュレーション空間を用いた手法では、コンフィギュレーション空間内で最短に近い動作が生成され

るために、各関節時刻歴は単調増加や単調現象に近づくことが原因と考えられる。続いて、図 10 の関節トルク時刻歴を見ると、図 10(a)の提案手法のトルク時刻歴から、開始時のトルクが 0 になっているため、中間目標点 C が想定通りに機能し、仮想バネ・ダンパ仮説の問題点を解消できていることが確認できた。また、図 10(b)のコンフィギュレーション空間を用いた結果では、8 秒時点で非常に大きなトルクが発生していることが確認できる。これはコンフィギュレーション空間を用いた手法は幾何学的アプローチであり、対象のダイナミクスを考慮できないために、実現性の低い動作を生成してしまったことが原因であると考えられる。図 10(a)の提案手法による結果では全時間で関節トルクが ± 1 [Nm]以内に収まっており、ダイナミクスモデルを利用することの有効性が確認できた。しかし、動作終了時間として想定した 10 秒時点の各時刻歴を見ると、図 9(a)の提案手法の関節角度時刻歴では動作が終了しておらず、やや遅れていることがわかる。それに対して、図 10(a)のトルク時刻歴を見ると、10 秒以降トルクはほぼ発生していない。これは、終点付近で目標点と手先位置の偏差が小さくなったことで、仮想的なバネによる外力が小さくなったことが原因と考えられる。これについては、バネやダンパを大きくすることや、弱い積分補償を利用することで対処が可能である。また、目標地点を変化させた場合でも、同様のシミュレーションパラメータを用いて動作を生成することに成功した。このとき、達成不可能な目標地点を入力すると、達成可能な姿勢で動作が終了する結果となった。このシミュレーション結果から、仮想的な外力が、手先位置の制御のほかに、拘束条件を満たすうえでも機能することが確認でき、冗長性を有する多体システムの動作生成に有効であることが示された。

3・2 ツリー構造での動作生成

3・2・1 動作生成対象

双腕ロボットに代表される、複数の枝分かれを持つツリー構造のロボットでは、全ての肢が目標値を与えられるとは限らない。目標値を持たない肢を、動作の拘束条件を満たすことに利用できるかを検証するために、ツリー構造のロボットに対して、3・1 と同様の検証を行う。対象の模式図を図 11 に示す。図 11(a)で示したロボットは、双腕ロボットを想定している。このロボットも 3・1 で扱ったアーム同様に固定されていない台座に取り付けられており、図 11(b)に示されるように、姿勢によって転倒する可能性があるものとする。単純化の為に、各リンクのパラメータは 3・1 で扱ったリンクと同様の物を使用した。また、双腕ロボットのモデルは 3・1 と同様にモジュール化されたモデルの連結によって再現した。

Fig.11 Dual-arm robot. The robot arm has a typical tree structure and this is fixed to a base plate as shown in Figure 11(a). The base plate is not fixed on the ground. Therefore, it can easily fall down depending on the posture as shown in Figure 11(b).

3・2・2 双腕ロボットの動作目標

双腕ロボットの動作目標と拘束条件の模式図を図 12(a),(b)にそれぞれ示す。台座に接続されたリンクを胴体とし、実線で示された腕を左腕、破線で示された腕を右腕とそれぞれ定義する。

Fig.12 Operation target and restriction condition. In Figure 12(a), red point A indicates the start position of the left end-effector (hand), and green point B indicates the target point of the left hand. The objective the operation is to move the left hand position from point A to point B. In Figure 12(b), magenta point indicates the center of gravity. The constraint condition is to restrict the center of gravity position within the width of the base plate.

(i) 左腕手先位置の移動

図 12(a)中の赤点は双腕ロボット左腕の先端(左手先)の初期位置 $A(-1, 0)$, 緑の点は左手先の目標位置 $B(-1.7, 0)$ を示している. 左手先位置を, 点 A から B まで移動させることを双腕ロボットの動作目標とする. この時右腕は自由端とする. また, 動作中の手先の軌跡は設定せず, 制約条件を満たしつつ最終的に目標座標 B にたどり着くことで目標達成とする.

(ii) 重心位置の拘束

図 12(b)中の紫の点は双腕ロボットの重心位置を示している. 転倒を回避するために, 重心の x 軸方向の移動範囲を台座の幅に拘束する. $3 \cdot 1 \cdot 2$ の拘束条件と同様に, 図 12(b)中の破線で挟まれた範囲が重心の移動できる範囲となる.

3・2・3 仮想外力の計算

(i) 手先位置の制御

$3 \cdot 1 \cdot 3(i)$ のロボットアームの制御と同様に, 仮想バネ・ダンパ仮説と, 目標地点 B を中心とし, 収縮する円弧状の目標値を利用して制御する. 本シミュレーションでも円弧半径の初期値は初期姿勢 A と目標地点 B との距離に等しく, 5 秒間で 0 になるように設定する. r の変動量は $3 \cdot 1$ 同様に 5 次多項式による補間によって与えた.

(ii) 重心位置の制御

$3 \cdot 1 \cdot 3(ii)$ と同様に, ロボット全体に加わる外力によって, 重心の位置を制御した. 重心位置が拘束範囲の境界に近づくと, 逆方向への外力がロボット全体に加わることで, 重心位置を制御する. 外力の計算はポテンシャル法に基づいて行った. ポテンシャル関数は $3 \cdot 1 \cdot 3(ii)$ の式(2)と同様の式を用いた. また, $3 \cdot 1 \cdot 3(ii)$ と同様に, 重心の移動速度が増大することを防ぐために, 仮想的な減衰を加えた. このときのポテンシャル関数のパラメータや, 仮想的な減衰の値は, $3 \cdot 1 \cdot 3(ii)$ と同様の値を使用した.

3・2・4 双腕ロボットの動作生成結果と考察

生成された動作を図 13 に示す. 図 13 中の太線は双腕ロボットを示しており, 色が濃くなるほど, 終了時間に近い時刻の姿勢を示している. 赤い点は左手先の初期位置, 緑の点は左手先の目標位置, 赤い破線は重心を拘束した領域の境界をそれぞれ示している. 青い破線は左手先の軌跡, 紫の実線は重心位置の軌跡を示している. 図 13 の結果から, 重心位置を拘束領域内に保ちながら, 左手先位置を目標位置まで移動させる動作の生成

に成功した. この時の各関節角度および各関節トルクの定義を図 14 に示す. また, 各関節角度の時刻歴と関節トルクの時刻歴を, それぞれ図 15, 図 16 に示す. ただし, 関節トルクは, $3 \cdot 1 \cdot 4$ と同様の理由から, 重力の影響を取り除いたものを示す.

Fig.13 Motion simulation results. The thick solid and dashed lines show the posture of the robot arm. Darker color indicates more recent posture. Red point indicates the initial point of the end-effector (hand), and green point indicates the target point of the hand. The blue dashed line indicates the trajectory of the hand. The magenta solid line indicates the trajectory of the center of gravity. The red dashed lines are boundaries of the area which restricts the center of gravity position. This indicates that the hand can reach the reference point, and also the center of gravity is kept in the restriction area.

Fig.14 Coordinates of the dual-arm robot. The link which connected to the base plate is defined as the body. The arm which is indicated by solid line is defined as the left arm, and the arm which is indicated by the dashed line is defined as the right arm. The base joint angle and torque are defined as θ_1 and τ_1 . Left arm joint angles are defined as θ_{11} and θ_{12} , and left arm joint torques are defined as τ_{11} and τ_{12} in sequence from the root. Right arm joint angles are defined as θ_{21} and θ_{22} , and right arm joint torques are defined as τ_{21} and τ_{22} in sequence from the root.

Fig. 15 Time history of joint angles. When the left arm moves, the right hand moves in the opposite direction to retrieve the position of the center of gravity. It is not necessary to specify the operation of the right arm.

Fig.16 Time history of joint torques. Even after finishing the operation of the left hand, the right hand continues to move for a moment. In this proposed method, the right arm moves spontaneously to keep the balance.

図 13 の結果から、目標を与えていない右腕が、重心位置を維持するために自動的に動いていることが確認できる。図 15 の間接角度時刻歴からも、右腕と左腕がほぼ同時に逆方向に動作することで、重心位置を維持しようとしていることが確認できる。図 16 の間接トルク時刻歴を見ると、動作終了時間として想定した 5 秒以降に着目すると、目標を達成した左腕は入力トルクがほぼ 0 になるのに対して、右腕は重心位置の維持のためにしばらくトルクが入力され続けていることが確認できる。これは、左腕への仮想外力は手先を目標位置まで動かすための仮想バネ・ダンパ仮説に基づいて計算された要素が支配的であったのに対し、右腕への仮想外力は、重心位置を維持するためのポテンシャル法に基づいて計算された要素が支配的であったことが理由である。このように、目的に応じた仮想外力によって、各腕の動作を同時に生成できることが確認できた。このことから、目標御を持たない自由な肢を利用する上でも、提案手法が有効であることが確認できた。

3・3 閉ループ構造での動作生成

3・3・1 動作生成対象

閉ループ構造は、パラレルリンク機構やモーションベースなどで利用されている構造であり、一つのリンクを複数のアクチュエータで動作させるため、より大きな力で動作させることが出来る。そのほか、単一の関節で構成した構造よりも、堅牢な構造が実現できるというメリットを持つ。しかし、閉ループ構造は閉ループを維持することそのものが幾何学的拘束条件となる。そのため、ダイナミクスまで考慮した動作を生成することが困難な場合がある。また、双腕ロボットなどは作業中に閉ループ構造になる場合がある。そのような状況下でも提案手法が機能することが可能かを検証する。対象として、作業中に両手でワークを把持した状態になった双腕ロボットアームを想定した。双腕ロボットのパラメータは 3・2 で使用したのと同じものを使用する。本シミュレーションの目的は手先の連結の維持が可能であるかの確認であるため、重心位置については考慮しないものとした。対象の模式図を図 17 に示す。

Fig.17 Robot arm with the closed loop structure. For simplicity, the base plate is fixed to ground in this model. This structure is built by connecting tow end-effector (hands) in Fig.11 (a).

3・3・2 閉ループ構造時の動作目標

閉ループ構造の動作目標の模式図を図 18 に示す。本シミュレーションで使用するモデルは 3・2 で使用した双腕ロボットと同一物とした。図 18 中の赤丸で示した部分が連結部であり、この状態で、赤で示したリンクを赤矢印の方向にそれぞれ 45° 動作させ、動作中に連結状態を維持することを動作の目標とする。

Fig.18 Operation target. This figure indicates the initial posture of dual-arm robot. The red circle indicates the connecting point. The red link is moving link. This link moves in direction indicated by red arrow.

3・3・3 外力の計算

手先の連結は、仮想バネ・ダンパ仮説に基づいて行った。連結の模式図を図 19 に示す。両腕の手先を非常に強い仮想的なバネとダンパによって接続する。手先の間に偏差が生じた場合、双方の手先にもう一方の手先方向への外力が発生することで、連結状態を維持する。この時使用した仮想的なバネとダンパの値は、試行錯誤的に決定した。

Fig.19 Connecting model of the robot. Both hands are assumed to be connected by virtual strong spring and damper.

3・3・4 動作生成結果

生成された動作を図 20 に示す。太線はロボットの姿勢を示しており、色が濃くなるほど終了時間に近い時刻

の姿勢を示している。また、その時の関節角度時刻歴応答を図 21 に示す。各関節角度の定義は図 14 と同じである。

Fig.20 Motion simulation results. The thick solid and dashed lines indicate the posture of the dual-arm robot. Darker color indicates more recent posture. The closed loop structure is kept all the time.

Fig.21 Each joint angle is defined in the same manner as the dual-arm robot. Formulas $\theta_{11} + \theta_{12} = 0$ and $\theta_{21} + \theta_{22} = 0$ are satisfied.

図 20 の結果から、提案手法を利用することで、ツリー構造のモデルを閉ループ構造のモデルとして維持させることが出来ることが確認できた。本シミュレーションの対象の場合、閉ループ部はひし形になる。そのため、閉ループが完全に維持できている場合は $\theta_{11} + \theta_{12} = 0$ 、 $\theta_{22} + \theta_{23} = 0$ の関係が常に成り立つ。図 21 の関節角度時刻歴応答からその関係をほぼ維持できているが確認できる。わずかに誤差が発生しているが、これは仮想空間の手先はバネによって拘束されており、バネは変位が発生しないと力を発生させないことが原因である。しかし、提案手法は最終的にシミュレーション結果を変位目標として実際のロボットに入力することを想定しており、ロボットの各関節の制御器の強さを調節することによってその誤差を吸収することができる。閉ループ構造は幾何学的拘束を持つため、ダイナミクスモデルを作ることがほかの構造に比べて難しくなることが多いが、提案する手法を用いることによって、連続チェーンやツリー構造のモデルを閉ループ構造のダイナミクスモデルとして代用できることが確認できた。

4 結言

本論文では、冗長性を持つ多体システムに対して、複数の拘束条件を持った動作の生成を行う手法の提案を行った。提案手法では、拘束条件を仮想的な外力によって表現し、ダイナミクスモデルに加えることで動作を制限する。その条件下でフィードバック制御シミュレーションを行うことで、シミュレーション結果は拘束条件を満たした動作となり、その結果を生成した動作として用いる。提案手法の有効性を検証するために以下のシミュレーションを実施し、それぞれの知見を得た。

(i) 連続チェーン構造モデルでのシミュレーション

仮想的な外力によって複数の拘束条件が付与できることを確認するために、ロボットアームを模した連続チェーンモデルに対して、アーム先端座標の制御と、重心位置の拘束を付与し、動作生成を行った。また、比較対象として幾何学的アプローチであるコンフィギュレーション空間を用いた手法でも同様の条件で動作生成を行い、結果を比較した。シミュレーションの結果、提案手法によって複数の拘束条件を満たした動作の生成に成功した。この結果から、複数の拘束条件を付与する上で、提案手法が有効に機能することが確認できた。また、結果の比較によって、特に関節トルクの観点において、ダイナミクスモデルを利用することの有効性が確認できた。

(ii) ツリー構造モデルでのシミュレーション

提案手法がツリー構造の、目標を持たない肢の利用に有効かどうかを確認するために、双腕ロボットを模したツリー構造のモデルに対して、片方の肢のアーム先端座標の制御と、(1)のシミュレーションと同様の拘束条件を与えて動作生成シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、目標を持たない肢を利用して重心位置を制御する動作の生成に成功した。この結果から、目標を持たない自由な肢の利用において、提案手法が有効であることが確認できた。

(iii) 閉ループ構造でのシミュレーション

構造自体が幾何学的な拘束条件になっている閉ループ構造を、両アーム先端を連結したツリー構造モデルで再現できることを確認するために、両アームの先端を仮想外力によって拘束し、動作させるシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、両アーム先端の連結状態を維持したまま動作させることに成功した。常に幾何学的拘束条件を持つために、ダイナミクスモデルの作成や、動的拘束条件の考慮が難しい閉ループモデルに対して、提案手法を利用することで容易にモデルの作成や条件の付与が行えることが確認できた。

今後は、拘束条件の付与に利用する仮想外力の最適な大きさを決定する手法の検証や、実機実験による検証を行っていく。

文 献

- Arimoto, S., Hashiguchi, H., Sekimoto, M. and Ozawa, R., Generation of natural motions for redundant multi-joint systems: A differential-geometric approach based upon the principle of least actions, *Journal of Robotic Systems*, Vol.22, No.11 (2005a), pp.583-605.
- Arimoto, S., Sekimoto, H., Ozawa, R., A challenge to Bernstein's degrees-of-freedom problem in both cases of human and robotic multi-joint movements, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, Vol.E88-A, No.10 (2005b), pp.2484-2495.
- 平岡弘之, ロボットの障害物回避への局所的なコンフィギュレーション空間の利用, *精密工学会誌*, Vol.60, No.1 (1994), pp.70-74.
- Hollerbach, J.M. and Suh, K.C., Redundancy resolution of manipulators through torque optimization, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No.4 (1987), pp.308-316.
- Khatib, O., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *The International Journal of Robotics Research* 5-1 (1986), pp.90-98.
- Khatib, O., A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation, *IEEE, Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No.1 (1987), pp.43-53.
- 近藤浩一, 複数探索戦略を用いた自由空間算出による障害物回避動作計画, *日本ロボット学会誌*, Vol.7, No.4 (1989), pp. 352-362.
- Liegeois, A., Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-7, No.12 (1977), pp.868-871.
- Nakamura, Y., *Advanced robotics: Redundancy and optimization* (1991), Addison-Wesley.
- 野見山英登, 有田大作, 谷口倫一郎, コンフィギュレーション空間の低次元化によるキャラクタ動作生成の効率化, *火の国情報シンポジウム講演論文集*(2007), pp.1-8.
- Russell, S., Norvig, P. and Furukawa, K., *Artificial intelligence: A modern approach* (2008), pp.927-933.
- 関本昌紘, 有本卓, 仮想バネ・ダンパ仮説に基づいた冗長関節ロボットアーム制御法の実験的検証, *日本ロボット学会誌*, Vol.25, No.5 (2007), pp.785-791.
- 鈴木康之, 梅谷俊治, 倉掛孝志, 東正毅, 局所探索法による多軸関節ロボットの経路計画, *2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集*(2005), pp.1245-1246
- Wachi, T., Ogawa, S., Tagawa, Y. and Venture, G., Dynamics and control of reconfigurable multi-body systems (Control utilizing embedded dynamic models in modules), *The 12th International Conference on Motion and Vibration (MoViC2014)* (2014), Paper No. 2C15
- Whitney, D.E., Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol.MMS-10 (1969), pp.47-53.

- Yashiro, Y., Eguchi K., Iwasaki S., Yamauchi Y. and Nakata M., Development of obstacle avoidance control for robot products using potential method, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.51, No.1 (2014), pp.40-45.
- Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, The International Journal of Robotics Research, Vol.4 No.2 (1985), pp.3-9.

References

- Arimoto, S., Hashiguchi, H., Sekimoto, M. and Ozawa, R., Generation of natural motions for redundant multi-joint systems: A differential-geometric approach based upon the principle of least actions, Journal of Robotic Systems, Vol.22, No.11 (2005a), pp.583-605.
- Arimoto, S., Sekimoto, H., Ozawa, R., A challenge to Bernstein's degrees-of-freedom problem in both cases of human and robotic multi-joint movements, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, Vol.E88-A, No.10 (2005b), pp.2484-2495.
- Hiraoka, H., Collision avoidance of manipulators using local configuration space representing contact state, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.60, No.1 (1994), pp.70-74 (in Japanese).
- Hollerbach, J.M. and Suh, K.C., Redundancy resolution of manipulators through torque optimization, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.4(1987), pp.308-316.
- Khatib, O., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, The International Journal of Robotics Research 5-1 (1986), pp.90-98.
- Khatib, O., A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation, IEEE, Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.1 (1987), pp.43-53.
- Kondo, K., Collision avoidance by free space enumeration using multiple search strategies, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.7, No.4 (1989), pp. 352-362 (in Japanese).
- Liegeois, A., Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-7, No.12 (1977), pp.868-871.
- Nakamura, Y., Advanced robotics: Redundancy and optimization (1991), Addison-Wesley.
- Nomiyama, H., Arita, D. and Taniguchi, R., Effective motion planning by dimensional reduction of the configuration space, Proceedings of the Hinokunijouhou Symposium (2007), pp.1-8 (in Japanese).
- Russell, S., Norvig, P. and Furukawa, K., Artificial intelligence: A modern approach (2008), pp.927-933.
- Sekimoto, M. and Arimoto, T., Experimental study on control method for robot arms with redundant joints based upon virtual spring-damper hypothesis, Journal of Robotics Society of Japan, Vol.25, No.5 (2007), pp.785-791 (in Japanese).
- Suzuki, Y., Umetani, S., Kurakake, T. and Higashi, M., A local search approach to path planning for a manipulator with many degrees of freedom, Proceedings of the Japan Society for Precision Engineering Spring Meeting 2005, pp.1245-1246 (in Japanese).
- Wachi, T., Ogawa, S., Tagawa, Y. and Venture, G., Dynamics and control of reconfigurable multi-body systems (Control utilizing embedded dynamic models in modules), Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration (MoViC2014) (2014), Paper No. 2C15.
- Whitney, D.E., Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol.MMS-10 (1969), pp.47-53.
- Yashiro, Y., Eguchi K., Iwasaki S., Yamauchi Y. and Nakata M., Development of obstacle avoidance control for robot products using potential method, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.51, No.1 (2014), pp.40-45.
- Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, The International Journal of Robotics Research, Vol.4 No.2 (1985), pp.3-9.