

# 弾性要素を有する超多自由度閉ループロボットの柔軟性制御

松浦 大輔(オハイオ州立大学) ○岩附 信行(東工大) 岡田 昌史 (東工大)

## Flexibility Control of Hyper Redundant Closed-Loop Robots Having Elastic Elements

Daisuke MATSUURA, The Ohio State University, \*Nobuyuki IWATSUKI, Tokyo Tech, Masafumi OKADA, Tokyo Tech

**Abstract** — When hyper redundant robots are used in complex and unpredictable environments like human living space, they should deal with various contacts between surrounding objects. Robots thus should plan and optimize applying force to the object surface and its distribution among contact area. This paper defines the ability to optimize stiffness distribution of a number of contact points as "Flexibility" and proposes elastic closed loop mechanism which has a serial chain of revolute joints with torsional coil springs as a lightweight and supple hyper redundant mechanism. Output stiffness is formulated based on the minimization of potential energy, the balancing of internal force and the velocity constraint to construct a closed-loop mechanism. Joint inputs to obtain the desired stiffness distribution and desired output position simultaneously are derived from partial derivative of the output stiffness and compensation by a learning control scheme. Motion control experiments with a 10R elastic closed loop robot show the effectiveness of the proposed control scheme.

**Key Words** : Hyper redundant robot, Stiffness distribution control, Elastic closed-loop mechanism

### 1. 緒言

人間の日常生活空間において、与えられた目標を器用に達成するには、極めて多くの冗長自由度を有する超多自由度ロボット<sup>[1]</sup>が有効である。超多自由度ロボットは様々な状況における周囲の物体との接触を的確に処理する必要があり、多数の出力節の位置・速度のみならず、対象物体に作用させるべき力とその分布も計画した上で、機構姿勢を最適化しなければならない。ロボットの発生力の制御手法としては、力制御<sup>[2]</sup>、コンプライアンス制御<sup>[3]</sup>などの手法が提案されているが、その多くはごく少数の冗長自由度を持つロボットの特定の出力点の発生力を扱っており、超多自由度ロボットへの適用は困難である。さらに、全関節にアクチュエータを用いることは重量増加を招くため、ばねなどの受動要素も用いた軽量かつ柔軟な機構を設計する必要がある。

そこで本研究では、超多自由度ロボットが任意の形状・剛性の物体に所望の分布を持った力を作用させる能力を「柔軟性」と呼び、その実現のために、ねじりコイルばねを付加した受動回転関節の直列連鎖を有する弾性冗長閉ループ機構を提案する。次に、弾性冗長閉ループロボットの多数の出力節上の接触点に加わる力と生じる変位の関係を表す出力剛性を求め、その関節角偏微分に基づいて求めた関節変位増分と誤差履歴線形和学習制御則<sup>[1]</sup>を合わせて用いて所望の出力剛性分布と出力位置を同時に達成する柔軟性制御則を構築する。最後に10R弾性冗長閉ループロボットを設計・試作し、複数の目標剛性分布の獲得と物体把持実験を行わせる運動制御実験の結果を元に提案した手法の有効性を示す。

### 2. 弾性冗長閉ループ機構の柔軟性制御

柔軟性制御を実現するため、図1に示すように2つの静止対偶に接続された能動関節の直列連鎖  $J_{L1}, \dots, J_{LN_L}$  および  $J_{R1}, \dots, J_{RN_R}$  (以下、アクチュエータ部

と呼ぶ)の末端に、受動回転関節とねじりコイルばねを組み合わせた弾性関節の直列連鎖  $J_1, \dots, J_{N_e}$  (以下、ばね部と呼ぶ)を接続した平面閉ループ機構を提案する。アクチュエータ部の関節を剛と見なすとき、出力剛性分布はばね部の形状のみで決定でき、アクチュエータ部の端点  $J_{LN_L}$  と  $J_{RN_R}$  の距離と、これらを結ぶ直線の傾きを変えて制御できる。ばね部各節に制御点を設け、この内の1点の位置制御を必ず達成すべき主目的運動、その他の制御点における出力剛性分布の制御を可能な限り達成すべき副目的運動とする。運動空間の自由度を  $M$ 、閉ループ機構成立のための拘束条件を  $\alpha$  とおくと、本機構の剛性分布制御に使用可能な冗長自由度は  $(N_e + N_r - M - \alpha)$  である。

### 3. 柔軟性制御則の導出

#### 3.1 出力剛性解析

まず、アクチュエータ入力  $\theta_{L1}, \dots, \theta_{LN_L}$ ,  $\theta_{R1}, \dots, \theta_{RN_R}$  を設定した際のばね部の姿勢を求める。アクチュエータ部の直列連鎖の順運動学解析にてばね部端点の位

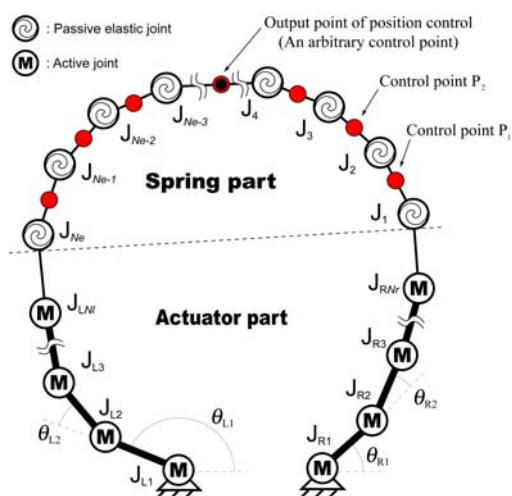


Fig.1 Elastic redundant closed loop mechanism

置を求め、幾何学的に成立するばね部初期姿勢を与えた後、ポテンシャルエネルギー $E$ を次式で得る。

$$E = \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{2} k_i \theta_{Ei}^2 \quad (1)$$

このポテンシャルエネルギーを勾配射影法<sup>[4]</sup>を用いて最小化する。ばね部への関節入力的一般解およびその関節角による偏微分はそれぞれ次式で書ける。

$$\dot{\theta}_E = J_{N_e}^{\#} \dot{r}_{N_e} + (I - J_{N_e}^{\#} J_{N_e}) k \frac{\partial E}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = (k_1 \theta_1 \quad \dots \quad k_{N_e} \theta_{N_e}) \quad (3)$$

ここに、 $J_{N_e}$ は関節 $J_1$ を静止対偶と見なしたときの関節 $J_{N_e}$ の速度 $\dot{r}_{N_e}$ に関するヤコビ行列、 $k_1, \dots, k_{N_e}$ は各関節のねじりコイルばねのばね定数である。ここで $\dot{r}_{N_e} = 0$ としてばね部両端を固定する制約条件を与え、各関節のポテンシャルエネルギーを最小化する関節角変位 $\dot{\theta}_E$ を次式(4)で求め、これが十分小さくなるまで関節角更新を繰り返してばね部の姿勢を決定する。

$$\dot{\theta}_E = k (I - J_{N_e}^{\#} J_{N_e}) (-k_1 \theta_1 \quad \dots \quad -k_{N_e} \theta_{N_e})^T \quad (4)$$

次に、各制御点における出力剛性を導出する。 $i$ 番目の制御点 $P_i$ に関する外力 $F_i$ で生じる変位 $\Delta R_i$ を、出力剛性行列 $K_i$ を導入し次式のように表す。

$$F_i = K_i \Delta R_i \quad (5)$$

ここで $F_i$ と $\Delta R_i$ は、出力自由度 $M$ と同数の基底ベクトルより、次式のように $M \times M$ の行列として与える。

$$F_i = (f_{i,0} \quad \dots \quad f_{i,M}), \quad R_i = (r_{i,0} \quad \dots \quad r_{i,M}) \quad (6)$$

外力 $F_i$ が各関節に発生させるトルク増分 $\Delta T_E$ は次式(7)となり、この変形より式(8)が得られる。

$$\Delta T_E = J_i^T F_i \rightarrow F_i = (J_i^T)^{\#} \Delta T_E \quad (7),(8)$$

トルクと関節角変位の増分は、出力自由度 $M$ と同数の基底ベクトルより $N_e \times M$ の行列として与える。

$$\Delta T_E = (\Delta \tau_0 \quad \dots \quad \Delta \tau_M), \quad \Delta \theta_E = (\Delta \theta_0 \quad \dots \quad \Delta \theta_M) \quad (9)$$

トルク増分 $\Delta T_E$ は、式(4)に用いたねじりコイルばねのばね定数 $k_i$ と関節角変位を用いて次式(10)でも書け、式(10)を式(8)に代入して、制御点の外力とばね部の各関節の関節角との関係を次式(11)が得られる。

$$\Delta T_E = \text{diag}(k_i) \Delta \theta_E \quad (10)$$

$$F_i = (J_i^T)^{\#} \text{diag}(k_i) \Delta \theta_E \quad (11)$$

式(5)に式(11)を代入し、制御点 $P_i$ の出力剛性 $K_i$ が、次式で得られる。

$$K_i = (J_i^T)^{\#} \text{diag}(k_i) \Delta \theta_E (J_i \Delta \theta_E)^{-1} \quad (12)$$

出力剛性の計算に必要なヤコビ行列 $J_i$ の導出の際には、閉ループ機構が成立することを考慮する必要がある。そこで、図2に模式的に示すように対象制御点 $P_i$ の左右の部分連鎖が $P_i$ に発生する速度が等しいことを表す、速度に関する閉ループ方程式を用いる<sup>[5]</sup>。まず、対象とする制御点 $P_i$ に関して、ばね部の関節入力と制御点の出力速度の関係は次式となる。

$$\Delta r_i = J_i \Delta \theta_E \quad (13)$$

次に、閉ループ方程式を記述する。

$$\Delta r_{Ei} = J_{iL} \Delta \theta_L = J_{iR} \Delta \theta_R \quad (14)$$

この式を個々の構成列ベクトルに書き下し、左右の要素を交換して任意に決定できる関節と拘束を受ける関節とに分離する。平面機構の並進速度が2自由度であることから2つの関節角の間に拘束が生じるため、分離した結果は次式となる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_{N_e} \\ \vdots \\ \Delta \theta_1 \\ \vdots \end{bmatrix} = [-j_{i+1} \quad j_i] \begin{bmatrix} \Delta \theta_{i+1} \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)の右辺に含まれる関節角増分を図2の拘束条件を満たすように求め、左辺に含まれる残りの関節入力は独立に決定可能とし、閉ループ方程式の拘束を受ける関節角変位増分 $\Delta \theta_S$ が次式で得られる。

$$\Delta \theta_S = J_S^{\#} J_G \Delta \theta_G = H \Delta \theta_G = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \Delta \theta_G \quad (16)$$

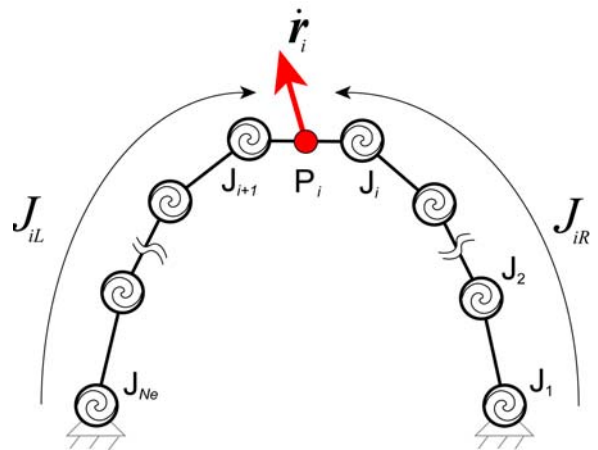


Fig.2 Closed-loop constraint among the output velocities

$$\begin{cases} J_{EG} = [j_{EN_e} \ j_{EN_{e-1}} \ \cdots \ j_{E1} \ -j_{E2} \ \cdots] & J_{ES} = [-j_{En+1} \ -j_{En}] \\ \Delta\theta_G = [\Delta\theta_{N_e} \ \Delta\theta_{N_e-1} \ \cdots \ \Delta\theta_1 \ \Delta\theta_2 \ \cdots]^T, \Delta\theta_S = [\Delta\theta_{i+1} \ \Delta\theta_i]^T \end{cases}$$

ここで、 $H$  は任意に定められた関節角変位  $\Delta\theta_G$  が拘束条件を満たすべき  $\Delta\theta_S$  へ与える影響を表すヤコビ行列であり、その構成ベクトル  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$  は  $(N_e-2)$  行の行ベクトルである。式(16)より、閉ループ機構が成立する条件を満たす  $\Delta\theta_S$  の各要素が次式で求められる。

$$\Delta\theta_{En-1} = \mathbf{h}_1 \Delta\theta_{EG}, \quad \Delta\theta_{En} = \mathbf{h}_2 \Delta\theta_{EG} \quad (17)$$

以上より、閉ループ機構を成立させるための拘束条件を考慮したヤコビ行列  $J_i$  が、次式により得られる。

$$J_i \Delta\theta_E = [-J_S \ J_G] \begin{bmatrix} \Delta\theta_S \\ \Delta\theta_G \end{bmatrix} = [H \ J_G] \Delta\theta_G \quad (18)$$

### 3.2 目標出力位置と目標剛性分布の同時達成

ばね部の複数の制御点における所望の剛性分布を達成する姿勢を獲得するため、各制御点に所望の出力剛性  ${}^d K_i$  を設定し、式(12)で求めた現在の出力剛性との残差を目的関数  $\phi(\theta_E)$  として、最小化する。

$$\phi(\theta_E) = \text{trace}({}^d K_i - K_i) \quad (19)$$

目的関数の関節角編微分より求めた関節角変位と、ばね部の関節入力ベクトルを次式(20), (21)で求める。

$$\dot{\theta}_i = k \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = k({}^d K_i - K_i) \frac{\partial K_i}{\partial \theta} \quad (20)$$

$$\dot{\theta}_E = [\cdots \ \dot{\theta}_i \ \cdots]^T \quad (21)$$

ここで、

$$\frac{\partial K_i}{\partial \theta} = \left( \frac{\partial J_i}{\partial \theta} \right) (k_1 \theta_1 \cdots k_{N_e} \theta_{N_e})^T + J_i (k_1 \cdots k_{N_e})^T \quad (22)$$

である。こうして得られた式(21)の関節入力により、ばね部の姿勢を更新するが、受動関節を直接駆動することはできないため図3に示すようにばね部端点の変位をアクチュエータ部の左右の端点の変位  $\Delta \mathbf{r}_L, \Delta \mathbf{r}_R$  へ変換して剛性分布制御を実行する。

このとき、ばね部の形状変化に伴って主目的運動の出力位置が所望の位置から外れる。そこで、図3の点線に示すように誤差履歴線形と学習制御則<sup>[1]</sup>による修正を加える。まず繰り返し計算の過程における主目的運動の出力誤差の履歴を、次式より求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{n-1,i} &= {}^d \mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_{n-1,i} \\ \mathbf{e}_{n-1,i-1} &= {}^d \mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_{n-1,i-1} \\ \mathbf{e}_{n,i-1} &= {}^d \mathbf{r} - \mathbf{r}_{n-1,i} \end{aligned} \quad (23)$$

$n$  は繰り返し計算回数、 $i$  は主目的運動の目標軌道を構成する各点を表す。得られた誤差履歴  $\mathbf{e}_{n,i}$  を用いて、アクチュエータ部左右の直列連鎖の出力変位と関節変位を次式で修整する。

$$\Delta^d \mathbf{r}_{n,i} = \Delta \mathbf{r}_{n-1,i} + C_0 \mathbf{e}_{n,i-1} - C_1 \mathbf{e}_{n-1,i-1} + C_2 \mathbf{e}_{n-1,i} \quad (24)$$

$$\Delta \theta_{L,n,i} = \Delta \theta_{L,n-1,i} + J_L^\# (C_0 \mathbf{e}_{n-1,i} + C_1 \mathbf{e}_{n-1,i-1} + C_2 \mathbf{e}_{n-1,i}) \quad (25)$$

$$\Delta \theta_{R,n,i} = \Delta \theta_{R,n-1,i} + J_R^\# (C_0 \mathbf{e}_{n-1,i} + C_1 \mathbf{e}_{n-1,i-1} + C_2 \mathbf{e}_{n-1,i})$$

ここで、 $\Delta \theta_{L,n,i}$  および  $\Delta \theta_{R,n,i}$  はアクチュエータ部の直列連鎖の関節入力ベクトル、 $J_L$  と  $J_R$  は、それぞれの直列連鎖端点のヤコビ行列である。 $C_0, C_1, C_2$  は学習係数で、それぞれ  $0 \leq C_0 \leq 1, -1 \leq C_1 \leq 0, 0 \leq C_2 \leq 1$  とする。

式(21)と式(25)を組み合わせた関節入力により、ロボットは所望の出力位置と出力剛性分布を同時に達成できる。

## 4. 柔軟性制御実験

提案した柔軟性制御則の有効性を、10R 弾性冗長閉ループロボットを用いて検証した。アクチュエータ部は各節長 100mm とし、分解能 512ppr のエンコーダを有する 5W 出力の DC モータに減速比 100:1 のハーモニックドライブを接続した 4 つのアクチュエータにより駆動する。ばね部は各節長 50mm とし、ばね定数  $2.0\text{N} \cdot \text{mm}^p$  のねじりコイルばねを付加した 6 個の回転関節を有する。ばね部中央の制御点に主目的運動の目標位置を与え、左右の節を含む 3 つの制御点の剛性分布を柔軟性制御則により制御した。

まず、静止節に垂直な方向の外力に関して、(i) 中央：1000N/m、外側：10N/m および(ii) 中央：500N/m、外側：1000N/m なる 2 種類の剛性分布を与えた。リ

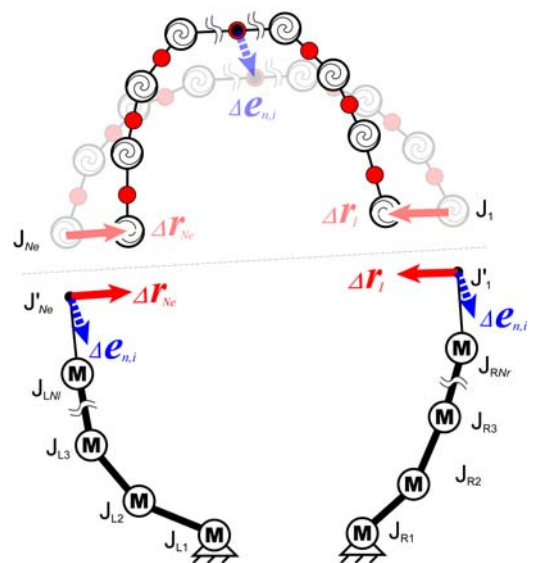
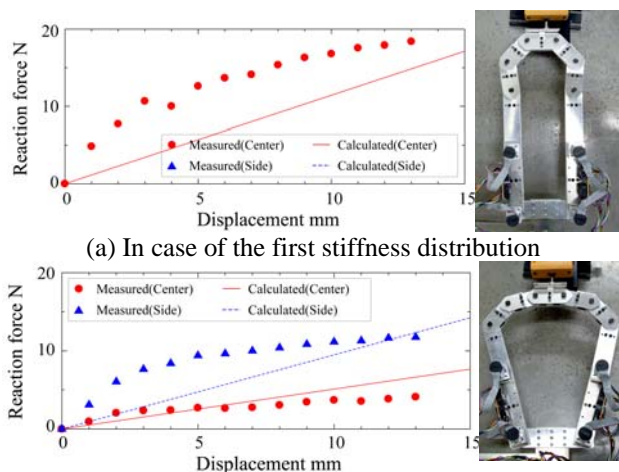


Fig.3 Flexibility control to achieve stiffness distribution while holding output position of certain control point





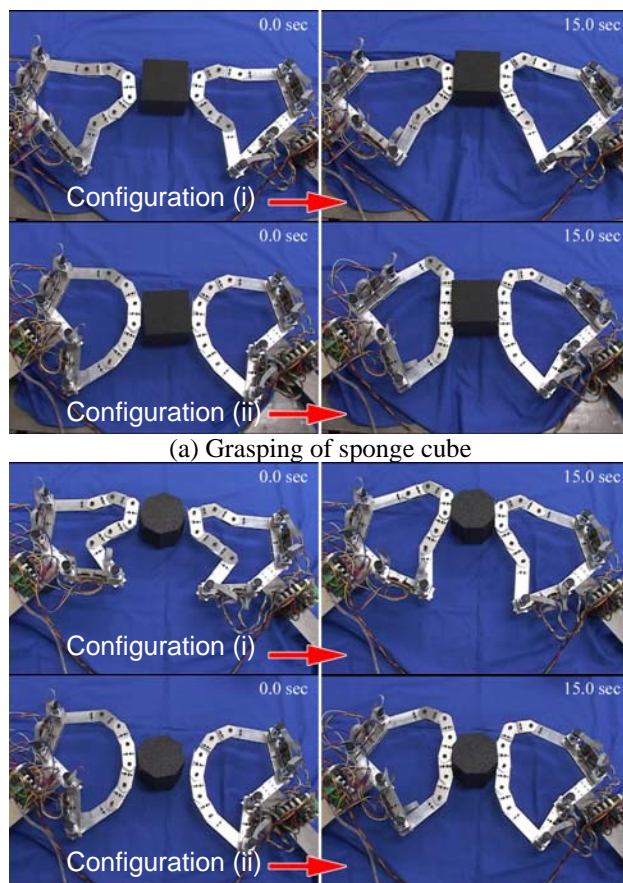
(a) In case of the first stiffness distribution  
(b) In case of the second stiffness distribution  
Fig.4 Output stiffness distribution of the two configurations

ニアステージ上に固定したフォースゲージを介して各制御点に変位を与え、計測した反力を元に得られた出力剛性分布と機構姿勢を、図4に示す。(i)の設定では、中央の制御点の剛性はよく一致したものの両側の制御点では有意な値を得られなかった。これは、与えた分布のすべてを同時に達成することが不可能なためと考えられる。一方(ii)の設定では目標に近い値が得られ、柔軟性制御則により妥当な結果を得られることが確認された。次に、2台のロボットを用いて異なる形状・材質の物体を把持させる実験を行った。図5(a)に示すスポンジ製の立方体を把持させた場合、狭い面積を強く把持できる(i)の剛性分布で確実な把持が可能であった。一方、同図(b)の発泡スチロール製の八角柱を把持させた場合には、機構形状を物体表面にならって変形させられる(ii)の分布が、滑りを生じずに把持可能であった。以上より、提案した弾性冗長閉ループロボットと柔軟性制御則を用いることで、ロボットが対象物体の形状・材質に適応した柔軟な動作を実現できることが示された。

## 5. 結言

本論文では、弾性閉ループ冗長機構の柔軟性制御を試みた。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- (1) 多数の接触点における作用力の分布を制御し、任意物体への柔軟な接触を行う柔軟性制御の概念を示し、その実現に有効な柔軟かつ軽量のロボット機構として、弾性冗長閉ループ機構を提案した。
- (2) コイルばねのポテンシャルエネルギーの最小化、機構内力の釣合いおよび閉ループ機構成立のための拘束条件に基づき、各制御点の出力剛性を導出し、その関節角による偏微分と誤差履歴線形と学習制御則に基づく柔軟性制御則を構築した。
- (3) 10R 弾性冗長閉ループロボットでの実験検証より、提案した手法にて任意形状・材質の物体に適応した把持動作の実行が可能であることを示した。



(a) Grasping of sponge cube  
(b) Grasping of Styrofoam octagonal block  
Fig.5 Result of the object grasping experiment

## 謝辞

本研究の遂行には、東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「先端ロボットの開発を核とした創造技術の革新」および平成 19 年度科学研究費補助金特別研究員奨励費(課題番号 1910592)の支援を受けた。ここに記して深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 松浦大輔, 岩附信行: “超多自由度ロボットの誤差履歴線形と学習に基づく運動制御と後退学習による初期姿勢の獲得”, 日本機械学会論文集 C 編, 73, 732, pp.2305-2311, 2007.
- [2] 吳建青 他: “未知な柔軟曲線状での倣い作業におけるマニピュレータの動的位置/力制御”, 日本機械学会論文集 C 編, 63, 607, pp.937-944, 1997.
- [3] K.Yokoi et al.: “A Method of Compliance Control for a Redundant Manipulator”, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol 3, pp.1927-1934, 1992. <http://www.org.kobe-u.ac.jp/rsj2008/>
- [4] R.V.Dubey et al.: “An Efficient Gradient Projection Optimization Scheme for a Seven-degree-of-freedom Redundant Robot with Spherical Wrist”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.28-36, 1988.
- [5] 中村仁彦, 山根克: “構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算”, 日本ロボット学会誌, 16, 8, pp.1152-1159, 1998.