

サイバネティック・ショルダの開発

—人間の肩の動きを模倣した 3 自由度機構—

岡田 昌史^{*1} 中村 仁彦^{*1*2}

Development of Cybernetic Shoulder

—A Three DOF Mechanism that Imitates Human Shoulder-Motions—

Masafumi Okada^{*1} and Yoshihiko Nakamura^{*1*2}

In this paper, we develop a three DOF mechanism for humanoid robots, which we call the cybernetic shoulder. This mechanism imitates the motion of the human shoulder and does not have a fixed center of rotation, which enables unique human-like motion in contrast to the conventional design of anthropomorphic seven DOF manipulators that have base three joint axes intersecting at a fixed point. Taking advantage of the cybernetic shoulder's closed kinematic chain, we can easily introduce the programmable passive compliance adopting the actuation redundancy and elastic members. This is important for the integrated safety of humanoid robots that are inherently required to physically interact with the human.

Key Words: Humanoid Robot, Shoulder Mechanism, Biological Motion, Passive Compliance, Closed Kinematic Chain

1. はじめに

人間型ロボット、ヒューマノイドは人間の日常生活を助け、人間と協調して作業を行うことが期待されている。ヒューマノイドや 2 足歩行については 1970 年代始めから数多くの研究がなされてきた [1] ~ [6]。ヒューマノイドでは人間と同じ空間に存在し作業のために接触することが特徴である。このため以下の技術を確立することが要求される。

1. 人間との形態類似性：人間との共存、協調作業および人間の代行などのため、人間に近い形態を持ち人間に近い動きを生成することが必要とされる。
2. 人間との接触類似性：人間と共存する空間において人間と環境に接触することは不可避的である。ヒューマノイドはこの際に人間や環境を傷つけることのないよう、軽量で柔軟であることが求められる。

人間は全身に多くの骨格と筋肉を持つ超多自由度系であり、これを協調させることで人間的でしなやかな動きを作り出している。特に人間の肩の構造はすべての人体関節の中で最も優れた可動性を持っており、五つの関節から構成されている [7]。これらは肩甲上腕関節・三角筋下関節（それぞれ Fig. 1 の A, B 点）と肩甲胸郭関節・肩鎖関節・胸鎖関節（それぞれ Fig. 1 の

C, D, E 点)の二つのグループに大別される。前者はいわゆる肩部の関節であり、後者は胸部の関節である。これらは閉リンク構造を持った靭帯によって結合され、それぞれがグループ内で機能的に連結して動く。上腕骨頭は半径 3 [cm] の球の 3 分の 1 の形を成すが、実際には垂直方向の直径の方が 3~4 [mm] 長く、完全な球ではない。また、この上腕骨頭は関節包に包み込まれ、関節面のかみ合わせは小さい。このように肩の構造は単純なボールジョイントではなく柔軟な対偶を作っている。この肩構造は胸部の関節を含めて 5 自由度を持ち、複雑で表情豊かな動きをなしている。人間の腕を自然に前後に動かしたときの様子を Fig. 2 に示す。図から分かるように腕を前に出したときと後ろに出したときで回転中心が異なっている。胸部関節と連動した運動が人間らしい自然な動きを作っている。従来のマニピュレータの、回転中心が 1 点で交わるような 3 自由度肩機構ではこの動きは困難であり、人間らしくない動作しか実現

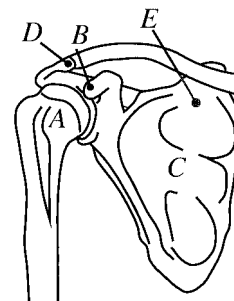


Fig. 1 The human shoulder

原稿受付 1999 年 4 月 19 日

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻

^{*2} 科学技術振興事業団、戦略的基礎研究推進事業

^{*1} Department of Mechano-Informatics, University of Tokyo

^{*2} CREST Program, The Japan Science and Technology Corporation

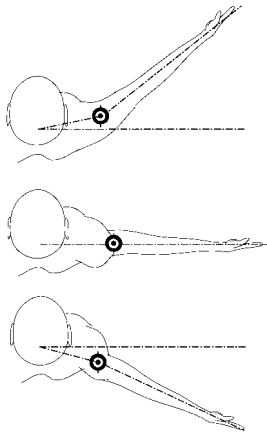


Fig. 2 Motion of the human shoulder

できない。ヒューマノイドの動作を形態的に人間と類似なものにするために、限られた機械的自由度で通常人間が肩を使う際の動きを模倣する機構を設計することが本論文の目的である。

本論文では、ヒューマノイドの肩の3自由度機構として従来とは異なった機構を提案する。この機構は人間の鎖骨を含む肩部骨格系の動きを模擬することを意図しており、ここでは「サイバネティック・ショルダ」と呼ぶ。3回転軸が1点で交わる従来の産業用ロボットのような一定の回転中心を有しない構造のため、サイバネティック・ショルダの動作は人間らしく見え、1.の要求を満たす。また、この機構は閉リンク構造に弾性リンクを含めることで機械的コンプライアンスを与え、2.の性質を与えることもできる。サイバネティック・ショルダと類似の機構として、Landeらによって開発された機構[8]がある。サイバネティック・ショルダはこの機構と構造は同じものであるが、アクチュエータの配置が異なっており、これはコンプライアンスの導入において大きな差を生む。本論文では、まずこれまでに開発された肩機構について述べ、その後サイバネティック・ショルダの設計・運動学およびパッシブコンプライアンスについて論じる。

2. 従来の3自由度機構

2.1 手首・肩機構

これまでにロボットの肩あるいは手首の3自由度機構として数多くの機構が提案されてきた。

1942年のPollardによるPosition Controlling Apparatus [9]は手首機構として初めて特許となったもので、人間の手首の骨や腱の構造をボールジョイントとリンク、テンドンを用いて実現している[2]。ロール回転のときにリンクとロッドが交差し可動範囲はあまり大きくない。

代表的な産業用ロボットの3自由度機構にPUMAロボットの手首機構がある。この機構はロール・ピッチ・ロール型であり3個のアクチュエータを下腕の根元の肘近くに置きフレキシブルカップリング、遊星歯車を用いて3回転が1点で交わる手首構造となっている。

Trevelyanは1985年に羊の毛を苴るロボットの先端機構としてElephant Trunk Wristを提案した[10]。この機構はユニ

バーサルジョイントを2連結した構造(Double U-Joint型)の間に1:1の歯車で拘束を与えたものである。この機構では象の鼻のような多自由度機構を模擬した動きをすることが特徴であり、三つの回転軸が1点では交わらない構造となる。

吉川らは[11]4自由度を持つ手首機構を開発した。冗長自由度を利用して特異点回避を行うことにより、従来の3自由度機構よりも姿勢操作性に優れた動きを実現した。この手首機構では4回転軸は1点で交わっている。

Roshimeは文献[2]において、人間のような動き、しなやかさを実現するためには人間と同じ構造の機構を用いることが重要であることを主張し、電動リニアアクチュエータによって筋肉の役割をもたせDouble U-Joint構造を有するThe Dextrous Armを開発した。これは二つのユニバーサルジョイントのカップリングが歯車で行われており、その間の距離を短くしたコンパクトな設計となっている。また、この機構を用いてトルソーロボットを開発した[12]。このロボットは肩に5、肘に1、手首に3の自由度を持ち人間と同じ自由度を持つものである。

大泉らは[13]球面連鎖機構による3自由度の手首関節を提案し、2自由度のプロトタイプを設計した[14]。この機構は二つの自由度を持つリンク機構を3個のリニアアクチュエータで駆動するもので、駆動冗長性を持たせることで大きな力を生み出す構造となっている。

2.2 ヒューマノイドロボットの機構

これまでに数多くのヒューマノイドが設計されてきた。柔らかさを考慮したヒューマノイドにHadaly [15]がある。これはMIAアーム[16][17]を用いることでプログラブル・パッシブコンプライアンスを実現し柔らかさを持たせているが、その3自由度機構は三つのアクチュエータを直列に連結した従来の構造で人間らしい動きの実現は考慮されていない。兵頭らは拮抗筋型駆動の腕を設計し、これに非線形ばね要素を導入することでプログラブル・パッシブコンプライアンスを持つ7自由度アームを開発している[18][19]。

HONDAヒューマノイド[6]は外観も人間らしく、またコンパクトに設計されている。腕・足にはそれぞれ7自由度があり、動歩行を実現するために大きな力を生み出す。しかし、その動きに人間らしさは考慮されておらず、柔らかさに対する考慮もなされていない。

Brooksら[20]は人工知能の研究のためにトルソー・ロボットCogを開発している。これは腕に6自由度を持つ上半身型ロボットで、バネ特性を持った柔らかな腕の設計を行っている[21]。

3. サイバネティック・ショルダ

3.1 サイバネティック・ショルダの機構

サイバネティック・ショルダの概略図をFig. 3に示す。点 b, β, δ はジンバル機構、点 d はボールジョイントであり、Double U-Joint型の構造である。 a は回転と並進、 e は並進のジョイントである。点 A を平面内で上下左右に動かすことで中心軸 G が β を固定軸として2方向に倒れる。円盤 D はその中心が軸 G と共に移動しその法線ベクトルは3本のリンク E によって決定される。 z 軸方向の回転はモータによって C を回

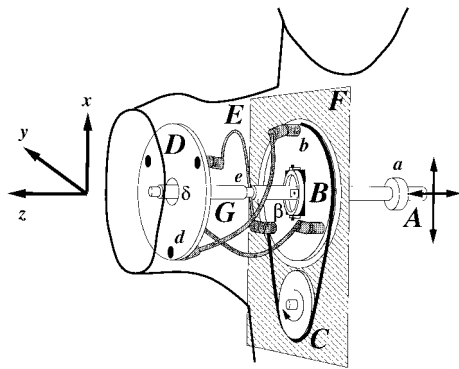


Fig. 3 The cybernetic shoulder

転させ、タイミングベルトによって円盤 B に伝え、さらに中心軸 G によって円盤 D に伝える。この機構は参考文献 [8] に示される機構と同様であるが、アクチュエータの配置において異なっている。サイバネティック・ショルダは点 A を平面内で移動させ肩先のヨー・ピッチを動かす 2 自由度のアクチュエータと円盤 C を回転させ肩先のロールを生み出すアクチュエータを持つ。中心軸 G を直接動かすことでヨー・ピッチを得る。一方、Lande らの機構では三つの点 b のうち二つを動かすアクチュエータによりヨー・ピッチを得、中心軸 G を回転させるアクチュエータによってロールを得る。運動学の観点からするとこれらの機構は同様の動きを持つが、コンプライアンスの設計において大きく異なる。これについては 5 章で述べる。この機構の特徴を以下に列挙する。

肩屈曲部の小型化: この機構のアクチュエータは点 A を上下左右に、円盤 C を回転させるものなので、すべて胴体の中に置くことができ肩屈曲部の寸法を小さくすることができる。このため、外観も人間のように滑らかに仕上げることが可能である。

可動範囲の大型化: リンク E は点 b 、点 d によって軸 G に対して 180 度対称な場所で固定されている。そのため、点 A での動きから円盤 D の動きへの拡大率が大きくなる。これにより、肩先の可動範囲は大きくなる。これは Double U-Joint 構造を用いたことによる。また、二つのユニバーサルジョイントのカップリングの拘束をリンクで行っているため内力を加えることでバックラッシュの除去が可能であり、歯車機構を用いたもの [2] と比較してバックラッシュの除去が容易である。この機構を上下方向に動かしたときの二次元モデルを Fig. 4 に示す。図のように中心の軸 G の回転角 ψ を ± 45 度で動かすことにより、円盤 D の法線ベクトルは ± 90 度で動く。

人間との動作形態類似性: サイバネティック・ショルダの回転中心は一定ではない。肩を y 軸方向に動かしたときの回転中心の変化を Fig. 5 に示す。この図は x 軸方向から射影した二次元図であり、回転中心を「●」で表す。これは Fig. 2 における人間の肩の自然な動きにおける回転中心の移動と等しく、腕を前後に動かすときに肩先が前後に動く。サイバネティック・ショルダの回転中心の移動が人間

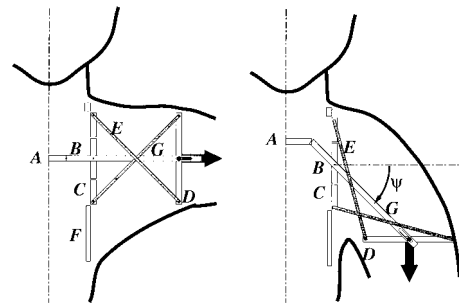


Fig. 4 Motion of the cybernetic shoulder

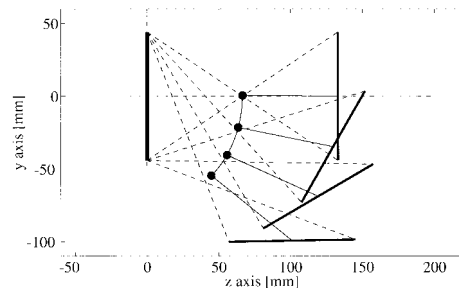


Fig. 5 Locus of the center of rotation

と類似の動きを持ち、人間らしい動きが実現できることが分かる。3 個のモータを直列に結合させた従来の肩の機構では、肩先を前に出すこともできず機械的な固い動きを感じさせる。ただし、人間の肩は鎖骨の自由度を含め 5 自由度を持つが、この機構は 3 自由度で肩の 5 自由度が通常見せる自然な動きを近似するものである点に注意されたい。

可動範囲外特異点: 理論的には ψ が ± 90 度のときに肩先の微小変位に対して点 A が無限距離を移動しなくてはならないため特異点となる。実際には点 b 、点 d はジナル構造であるため構造的に特異点に達するだけの角度を回転することはできない。プロトタイプでは点 b 、点 d にユニバーサルジョイントを用いた。このため可動範囲はロール回転に依存し多少前後するが約 $\psi = \pm 45$ 度である。したがって、サイバネティック・ショルダは可動範囲内に特異点を持たない。ただし、点 b と点 d に用いたユニバーサルジョイントの可動範囲をもっと広くとることで $-90 [\text{degree}] < \psi < 90 [\text{degree}]$ の範囲で可動範囲を拡大することも可能である。

サイバネティック・ショルダのプロトタイプを Fig. 6 に示す。胴体部高さが約 400 [mm]、左右肩の中心点 δ 間が約 600 [mm] である。モータは MAXON 社の DC モータ (RE ϕ 35 [mm]、グライフイト、90 [W]) を用い、点 A における前後上下の並進運動はボールスクリュによって実現した。ギア比は z 軸周りのロール回転が 1 : 400、ピッチ、ヨー回転方向は機構上 1 : 100 ~ 150 の間で変化する。模擬的な腕と首を取り付けて動かしたときの写真を Fig. 7 に示す。人間らしい肩の動きが実現できている様子が読みとれる。

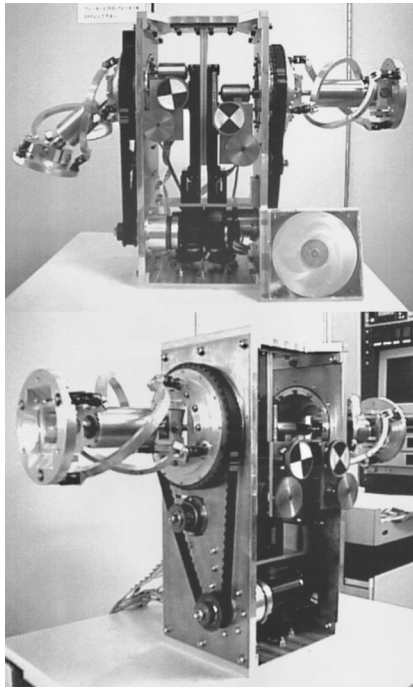


Fig. 6 Photographs of the cybernetic shoulder

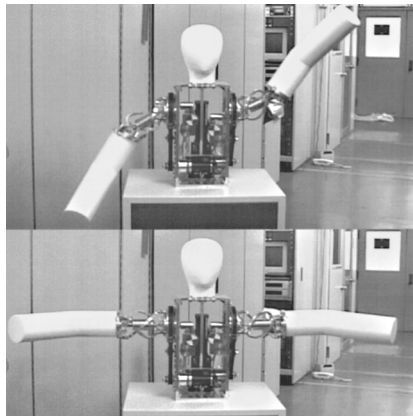


Fig. 7 Motion of the experimental system

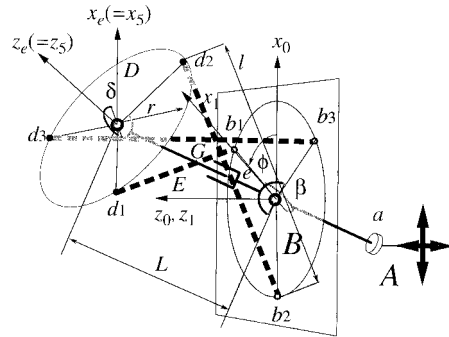


Fig. 8 Model of the cybernetic shoulder

である。さて、点 β および点 δ はジンバル構造であった。そこで、 x_1 軸まわりに θ_{x1} , y_2 軸まわりに θ_{y2} , y_3 軸まわりに θ_{y3} , x_4 軸まわりに θ_{x4} の回転を考えると、

$$d_i^0 = \delta + R d_i^e \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\delta := L R_A e_z \quad (4)$$

$$R := R_A R_B \quad (5)$$

$$R_A := R_{\theta_{x1}}^{x_1} R_{\theta_{y2}}^{y_2} \quad (6)$$

$$R_B := R_{\theta_{y3}}^{y_3} R_{\theta_{x4}}^{x_4} R_{\pi}^{z_6} \quad (7)$$

$$e_z = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

の関係式が成り立つ。なお、 θ_{x1}, θ_{y2} は点 A の x_0, y_0 座標の値を与えることで得られる値であり、 ϕ は円盤 C の回転角から得られる。すなわち、未知数は $\theta_{x4}, \theta_{y3}, L$ である。さて、この機構の拘束条件はリンク E の長さが一定であることである。これにより、

$$|d_i^0 - b_i^0| = \ell_i \quad (9)$$

が得られる。なお、 $\ell_1 = \ell_2 = \ell_3 = \ell$ であるが、次章のために ℓ_i の表現を用いた。式(3)より式(9)は

$$|L R_A e_z + R d_i^e - b_i^0| = \ell_i \quad (10)$$

となる。この方程式の解を解析的に得ることは難しい。そこで数値的に解を求める。いま、評価関数 J を次式で与える。

$$J = \sum_{i=1}^3 J_i^2 \quad (11)$$

$$J_i := |L R_A e_z + R d_i^e - b_i^0| - \ell_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

このとき、

$$T_{\theta_{x4}} := \tan \frac{\theta_{x4}}{2} \quad (13)$$

$$T_{\theta_{y3}} := \tan \frac{\theta_{y3}}{2} \quad (14)$$

として、現在の $L, T_{\theta_{x4}}, T_{\theta_{y3}}$ を

$$T_{\theta_{x4}} = T_{\theta_{x4}} - k_1 \frac{\partial J}{\partial T_{\theta_{x4}}} \quad (15)$$

$$T_{\theta_{y3}} = T_{\theta_{y3}} - k_2 \frac{\partial J}{\partial T_{\theta_{y3}}} \quad (16)$$

$$L = L - k_3 \frac{\partial J}{\partial L} \quad (17)$$

3.2 運動学問題

本節ではサイバネティック・ショルダの運動学問題を解く。この機構は複雑な閉リンク構造を持つため運動学問題を解析的に解くことは困難である。そこで数値的に解を得る。

サイバネティック・ショルダに対して Fig. 8 のように座標軸・パラメータを設定する。円盤 B の中心 β に中心を置く $x_0 y_0 z_0$ 座標系を絶対座標系とし、円盤 D の中心 δ に原点を置いた $x_e y_e z_e (= x_5 y_5 z_5)$ 座標系を手先座標系とする。初期状態では b_1 が x_0 軸と重なるものとする。以下では、 $x_i y_i z_i$ 座標系で見たベクトルに $[\cdot]^i$ と表記し、 ξ 軸まわりの θ の回転を R_{θ}^{ξ} で表す。 z_0 軸まわりの ψ の回転により、

$$b_i^0 = R_{\phi}^{z_0} R_{\frac{2}{3}(i-1)\pi}^{z_0} [r \ 0 \ 0]^T \quad (1)$$

$$d_i^e = R_{\frac{2}{3}(i-1)\pi+\pi}^{z_e} [r \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

で更新し、これを繰り返すことで解を得る。なお、 k_1, k_2, k_3 は設計パラメータであり、 $\frac{\partial J}{\partial T_{\theta_{x4}}}, \frac{\partial J}{\partial T_{\theta_{y3}}}, \frac{\partial J}{\partial L}$ は現在の $\theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{x4}, \theta_{y3}, L$ を用いて、

$$\frac{\partial J}{\partial s} = 2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial J_i}{\partial s} J_i \quad (s = T_{\theta_{x4}}, T_{\theta_{y3}}, L) \quad (18)$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial L} = |\mathbf{R}_A \mathbf{e}_z| \quad (19)$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial T_{\theta_{x4}}} = \left| L \frac{\partial \mathbf{R}_A}{\partial \theta_{x4}} \mathbf{e}_z + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_{x4}} \mathbf{d}_i^e \right| \quad (20)$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial T_{\theta_{y3}}} = \left| L \frac{\partial \mathbf{R}_A}{\partial \theta_{y3}} \mathbf{e}_z + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_{y3}} \mathbf{d}_i^e \right| \quad (21)$$

で得られる。これにより運動学問題の解が数値的に得られる。なお、この計算は 10 回程度の繰り返しで、移動長さに対して約 2% 以内の誤差に入ることを確認している。

4. パッシブコンプライアンスの解析と設計

4.1 パッシブコンプライアンス

ロボットがコンプライアンスを持つ方法として、ソフトウェアで仮想的なコンプライアンスを実現させるアクティブコンプライアンスと、機構自体が柔らかさを持つパッシブコンプライアンスがある。アクティブコンプライアンスはコンプライアンスが可変であるため状況に応じて希望のパラメータを設定することができる利点を持つが、ロボットの物理パラメータの同定誤差やセンサの分解能、制御システムのサンプリングタイム、入力エネルギーの上界などのハードウェアの限界により信頼性に欠ける面がある。一方、パッシブコンプライアンスはセンサや制御システムに依存しない信頼性を持つ。ヒューマノイドは人間が数多く存在する環境で活動し、周りに危害を加えないことが大きな要求の一つとなる。そのため、信頼性の高いパッシブコンプライアンスの役割が重要となる。

コンプライアンスは動的なコンプライアンスと幾何学的なコンプライアンスが存在する。前者は衝撃力などに対するもので、ロボットの質量や等価慣性モーメントなどロボットのダイナミクスに依存する。後者は静的なひずみに関係するもので、ロボットの機構に依存する。本章では幾何学的なコンプライアンスに関して考察する。

4.2 コンプライアンス空間とコンプライアンス楕円体

ここではリンク系のコンプライアンスを解析的に表現するために、コンプライアンス空間の概念を用いる。リンクのある点 A における位置と姿勢を表現する六つのパラメータ

$$\mathbf{p}_A := [p_{A1} \ p_{A2} \ \cdots \ p_{A6}]^T \quad (22)$$

の微小変化量を

$$\Delta \mathbf{p}_A := [\Delta p_{A1} \ \Delta p_{A2} \ \cdots \ \Delta p_{A6}]^T \quad (23)$$

とする。いま、システムのコンプライアンスがある関節のばね定数を k_1, k_2, \dots, k_n としたときに

$$\mathbf{K} := \text{diag} \{ k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_n \} \quad (24)$$

で表される行列 \mathbf{K} をばね定数行列と呼ぶことにする。リンク系ではばね定数が 0 もしくは無限大ということは現実的ではないため、一般性を失うことなく

$$\text{rank}(\mathbf{K}) = n \quad (25)$$

を仮定する。このコンプライアンスを持つ関節の各関節変数を

$$\mathbf{q} := [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n]^T \quad (26)$$

とおいたときの各変数の微小変化量を

$$\Delta \mathbf{q} := [\Delta q_1 \ \Delta q_2 \ \cdots \ \Delta q_n]^T \quad (27)$$

としたときに

$$\Delta \mathbf{p}_A = \mathbf{J}_A \Delta \mathbf{q} \quad (28)$$

$$\mathbf{J}_A := \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{A1}}{\partial q_1} & \frac{\partial p_{A2}}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial p_{A6}}{\partial q_1} \\ \frac{\partial p_{A1}}{\partial q_2} & \frac{\partial p_{A2}}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial p_{A6}}{\partial q_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{A1}}{\partial q_n} & \frac{\partial p_{A2}}{\partial q_n} & \cdots & \frac{\partial p_{A6}}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (29)$$

と表されるリンク機構のヤコビ行列 \mathbf{J}_A を用いて

$$\mathbf{C}_A = \mathbf{J}_A \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J}_A^T \quad (30)$$

でコンプライアンス行列 \mathbf{C}_A を定義する。この \mathbf{C}_A を用いると、リンク上のある点 A にかかる力を \mathbf{F}_A とするとき、 $\Delta \mathbf{p}_A$ は

$$\Delta \mathbf{p}_A = \mathbf{C}_A \mathbf{F}_A \quad (31)$$

で表される。ただし \mathbf{F}_A は位置と方向の六つのパラメータを持つベクトルであり、その座標系は \mathbf{p}_A の座標系と一致する。このとき、独立な六つのベクトル $\mathbf{F}_A^1, \mathbf{F}_A^2, \dots, \mathbf{F}_A^6$ によって式 (31) によって定まる $\Delta \mathbf{p}_A^1, \Delta \mathbf{p}_A^2, \dots, \Delta \mathbf{p}_A^6$ で張られる空間 \mathcal{S}_A

$$\mathcal{S}_A := \text{span} \{ \Delta \mathbf{p}_A^1 \ \Delta \mathbf{p}_A^2 \ \cdots \ \Delta \mathbf{p}_A^6 \} \quad (32)$$

をコンプライアンス空間と呼ぶ。このとき

$$\dim(\mathcal{S}_A) = \text{rank}(\mathbf{C}_A) = \text{rank}(\mathbf{J}_A) \quad (33)$$

が成り立ち、コンプライアンス空間の次元はヤコビ行列 \mathbf{J}_A の階数と等しい。これは

$$\text{rank}(\mathbf{J}_A) = \alpha < 6 \quad (34)$$

となるような姿勢および点 A では、力 \mathbf{F}_A に対してコンプライアンスを持たない成分が存在するというを意味する。すなわち、 \mathbf{J}_A の零空間 $\ker(\mathbf{J}_A)$ の方向にコンプライアンスを持たない。さらに、次節の議論のため次のコンプライアンス楕円体を定義する。

定義 コンプライアンス行列の特異値の大きさだけの軸の長さを持つ多次元楕円体をコンプライアンス楕円体と呼ぶ。この楕円体の次元はコンプライアンス空間の次元に等しい。

一般にばね定数 k のばねが力 F によって Δx だけ長さが変化している場合、ばねの持つエネルギー E は

$$E = \frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2k}F^2 = \frac{F^2}{2}C \propto C \quad (35)$$

で表される。ただし C はコンプライアンスである。この関係から、コンプライアンス楕円体の大きさは力 F が働いたときに弾性リンク系が吸収可能なエネルギーの大きさを表現しているといえる。

4.3 分散型コンプライアンス

リンク系の手先に多自由度のコンプライアンスが存在する場合を考える。リンク系に分散された各関節が 1 自由度のコンプライアンスを持ち、これらの和によって手先のコンプライアンスが実現されているとき、これを分散型コンプライアンスと定義する。この例を Fig. 9 に示す。この図では関節が三つ存在しそれぞれが回転方向にコンプライアンスを持っている。これらの和によって手先のコンプライアンスが実現される。この機構の特徴を以下に列挙する。

- (1)コンプライアンスを各関節に組み込むため、機構は比較的容易である。
- (2)根元に近いリンクのコンプライアンスは自由度が低いためコンプライアンスが存在しない方向が存在する。例えば Fig. 9 のリンク l_1 上の点 B におけるコンプライアンス行列を C_B^d とすると

$$\text{rank}(C_B^d) = 1 \quad (36)$$

である。このため、力 F_2 に対してはコンプライアンスを持つが力 F_4 に対してはコンプライアンスを持たない。同様に力 F_1 に対してはコンプライアンスを持つが力 F_3 に対してはコンプライアンスを持たない。

このリンク系に対するコンプライアンス楕円体を Fig. 10 に図示する。これは Fig. 9 のリンク系に対して、リンクを体積を持たない直線とみなし、これを Fig. 9 の姿勢における点 A, B, C, D においてコンプライアンス楕円体を表現したものである。なお、ここではパラメータは無次元化して用いたため各軸の単位には意味を持たず省略した。一般にコンプライアンス楕円体の行数は 6 であるが、ここではリンク系の変位に対する変形のみを考え、姿勢の変化に対するコンプライアンスは考慮していないため

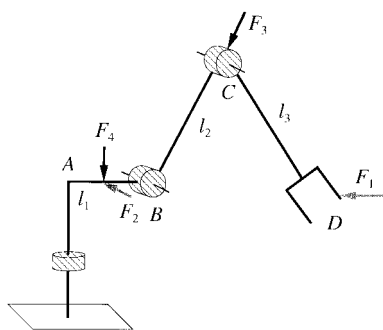


Fig. 9 Distributed compliance

$$\max(\text{rank}(C_i^d)) = 3 \quad (i = A, B, C, D) \quad (37)$$

である。点 D でのコンプライアンス楕円体は三次元であるのに対し、点 C では二次元になり点 B では一次元、点 A では 0 次元になる。コンプライアンス楕円体はリンク系が吸収するエネルギーの大きさを示しているためコンプライアンス楕円体の次元が落ちる方向、すなわちコンプライアンス行列の特異値 0 における右特異ベクトルの方向の力がリンクに作用した場合、リンク系はエネルギーを吸収できずに、いずれかの場所に衝撃となって負担になる。分散型コンプライアンスでは各リンクにおけるコンプライアンス楕円体に大きな偏りが生じ、特に根元に近いリンクではその次元が小さくなる特徴を持つ。このタイプのコンプライアンスは Hadaly [15] に導入されており、コンパクトな設計によって実現されている。

4.4 集中型コンプライアンス

リンク系の手先に多自由度のコンプライアンスが存在するとき、このコンプライアンスがリンク系のある 1 点に集中した多自由度のコンプライアンスによって実現されている場合、これを集中型コンプライアンスと定義する。この例を Fig. 11 に示す。この図では各関節はコンプライアンスを持たずリンク系の根元に多自由度のコンプライアンスが存在する。この機構の特徴を以下に列挙する。

- (1)多自由度のコンプライアンスを持つ機構を組み込むため特別な機構を要し、その大きさは比較的大きくなる。ただし、閉リンク構造を用いることで容易に実現が可能である。
- (2)分散型コンプライアンスに対して一様なコンプライアンス

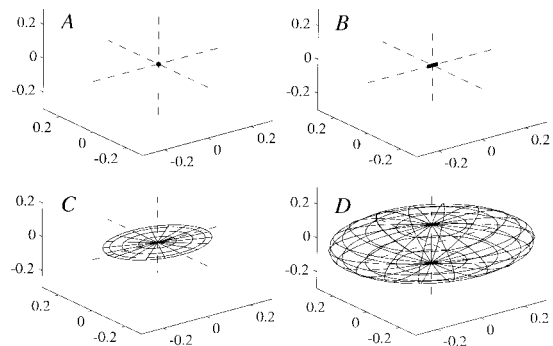


Fig. 10 Compliance ellipsoid of the distributed compliance

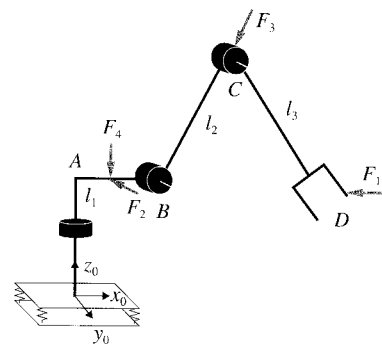


Fig. 11 Centralized compliance

空間を持つため、リンク系の各点におけるコンプライアンス楕円体の次元はほぼ等しくなる。例えば Fig. 11 では F_1 から F_4 までの全ての外力に対してコンプライアンスを有する。

このリンク系に対して、分散型コンプライアンスの場合と同様に Fig. 11 における点 A から D のコンプライアンス楕円体を Fig. 12 に示す。ここでは根元に x_0, y_0 軸まわりの回転のコンプライアンスと z_0 軸方向の並進のコンプライアンスを設けた。リンク系の各場所においてほぼ同様のコンプライアンスが得られる様子が理解できる。分散型コンプライアンスでは手先の位置のコンプライアンスに対して、比較的球に近い三次元のコンプライアンス楕円体を得られた。これはそれぞれの関節が回転軸まわりでコンプライアンスを持ち、回転軸から離れた場所では距離の 2 乗に比例した十分なコンプライアンスが得られるためである。これに対し並進型のコンプライアンスは距離とは無関係で軸方向に一樣のコンプライアンスを持つ。さらに、並進型では並進距離にハードウェア上の規制がある場合が多いため大きなコンプライアンスを持つ機構を設計することは難しい。集中型コンプライアンスで手先の位置に対する 3 自由度のコンプライアンスを実現するためには並進型のコンプライアンスを導入する必要がある。このため、手先で球に近いコンプライアンス楕円体を得ることは難しく、Fig. 12 のように根元のリンクに対して手先ではコンプライアンス行列の特異値の一つが他に比べ小さくなりやすく、コンプライアンス楕円体は平らな形になる傾向が強い。

ヒューマノイドは人間社会で動作し、人間は様々な方向・場所でヒューマノイドに衝突する。このため、すべてのリンクに多自由度のコンプライアンスが存在する集中型コンプライアンスの役割が必要となる。また、リンク系がすべての方向の力に対してコンプライアンスを有するためには少なくとも 3 自由度のコンプライアンスが必要である。これより、ヒューマノイドの腕部の根元は肩機構があり、柔軟で安全なヒューマノイドを設計するためには肩部にコンパクトで少なくとも 3 自由度の集中型コンプライアンス機構を導入することが必要である。

動的な力に対するコンプライアンスの観点からすれば、集中型コンプライアンスは分散型コンプライアンスに比べ等価慣性モーメントが大きくなり衝突時の衝撃力はやや大きくなる。こ

れには腕を軽いもので設計するなどの対処法が必要である。

5. サイバネティック・ショルダのコンプライアンス

サイバネティック・ショルダは肩の根元に 3 自由度のコンプライアンスを持つ機構であり、集中型コンプライアンスの導入が容易である。この機構へのコンプライアンスの導入に対する利点を以下に挙げる。

- (1) サイバネティック・ショルダは閉リンク構造を持つため、コンパクトな寸法でコンプライアンス機構が導入できる。
- (2) 本論文におけるサイバネティック・ショルダのプロトタイプではリンク E のばね特性によって、肩先で 3 自由度のコンプライアンスを設計できる。しかし、例えば Fig. 3 における円盤 B と円盤 C の回転を伝えるベルトの張力にはばね特性を持たせるなど、さらに多くのコンプライアンスを実現することができる。これは、閉リンク機構を導入することによるものである。
- (3) リンクのひずみを正確に計測することは難しい。リンクのひずみ特性は非線形性を有するが、一般にはこれを一樣なひずみで近似する。しかし、閉リンク構造を持つサイバネティック・ショルダでは Fig. 3 における点 δ のジンバル機構の回転、スライド e の移動距離を計測することで、リンク E のひずみを計測することなく正確な手先のたわみ・位置を計測することができる。これも上述の利点と同様に閉リンク機構を導入したことによるものである。
- (4) 先に述べたように、サイバネティック・ショルダは参考文献 [8] と同様の構造を持つがアクチュエータの配置が異なる。サイバネティック・ショルダでは Fig. 3 の点 A を駆動するため中心軸 G は剛体で設計される。そのため手先にかかる外力が働くと中心軸 G とリンク E で負荷を受ける。また、上述の理由から手先のたわみ・位置を計算可能なものとなっている。一方、Lande らの機構ではリンク E が駆動されるため外力に対してその大体がリンク E の負荷になる。このためリンク E は適度な硬さを持たなければ自重を支えられないものになってしまう。また、手先のひずみ・位置を計測するためには点 β におけるジンバルの角度の検出も必要となる。これらより、サイバネティック・ショルダにおける駆動の方が閉リンク構造の利点を生かしたものであるといえる。

リンク E は式 (9) によって長さの拘束を与え、これにより肩先の位置と姿勢が決定される。そこで、リンク E の長さ方向の剛性によって機構の柔らかさを特徴づけることができる。このリンクはユニバーサルジョイントとボールジョイントによって円盤 B, D に結合されているため、ねじれと長さ方向に垂直な方向への変形は拘束に影響を与えない。式 (10) を l_i で偏微分し、 l_i の変化量 Δl_i を考えることで、

$$\begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta \theta_{x4} \\ \Delta \theta_{y3} \end{bmatrix} = F(L, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{x0}, \theta_{y0}) \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} \quad (38)$$

の関係が得られる。ただし、 $\Delta L, \Delta \theta_{x4}, \Delta \theta_{y3}$ はそれぞれ $L, \theta_{x4}, \theta_{y3}$ の変化量であり、 $F(\cdot)$ は l_1, l_2, l_3 の変化速度に

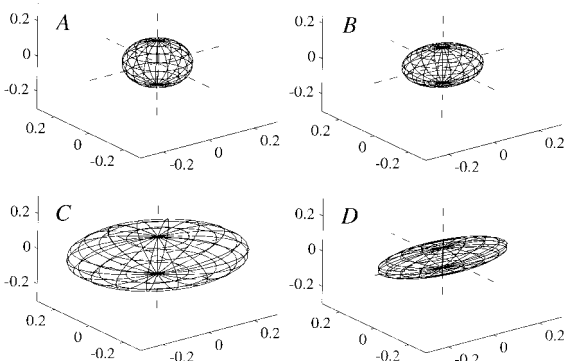


Fig. 12 Compliance ellipsoid of the centralized compliance

対する $L, \theta_{x4}, \theta_{y3}$ の変化速度の関係を表すヤコビ行列で表される。三つのリンク E の長さ変化により, $L, \theta_{x4}, \theta_{y3}$ が変化する。この F を用いるとサイバネティック・ショルダの肩先における $z_e, \theta_{x4}, \theta_{y3}$ 方向のコンプライアンス行列 C_c は,

$$C_c = FK_E^{-1}F^T \quad (39)$$

で表される。ただし, K_E は三つのリンク E の長さ方向の微小変化に対するばね定数 $k_{\ell 1}, k_{\ell 2}, k_{\ell 3}$ を用いて

$$K_E := \text{diag} \{ k_{\ell 1}, k_{\ell 2}, k_{\ell 3} \} \quad (40)$$

で得られる。このように, リンクの剛性によって $L, \theta_{x4}, \theta_{y3}$ 方向の剛性が設計できる。

サイバネティック・ショルダのプロトタイプではリンク E は中心の軸 G との接触を避けるために円弧状の形状をしている。そのため, Fig. 13 上図のように点 b_i と点 d_i での接点を結ぶ直線方向にばね剛性を有し (図の矢印方向), 拘束を生み出す

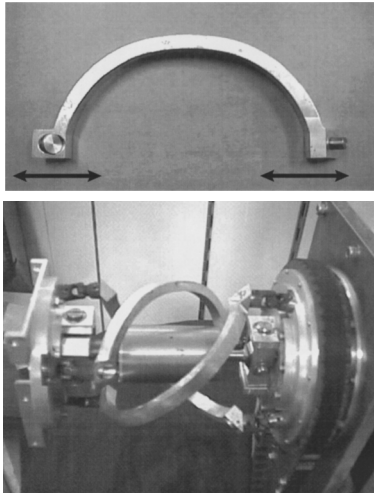


Fig. 13 Cybernetic Shoulder with rigid links

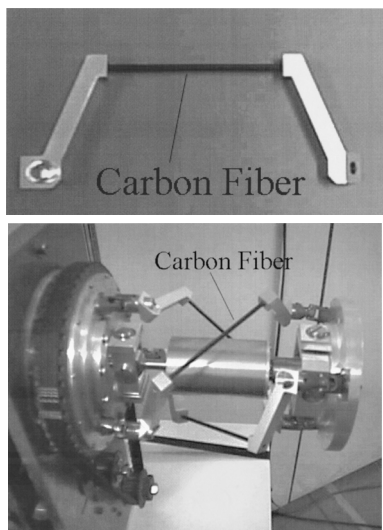


Fig. 14 A prototype of the compliant link

長さ ℓ_i が変化することでばね特性を出すことができる。下図はこのアルミニウム合金リンク (断面積が $7[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$) を用いたサイバネティック・ショルダである。一方, Fig. 14 下図では柔らかな材料としてカーボンファイバを用いたものである。カーボンファイバは柔らかな特性により大きなコンプライアンスを持つ。また, 大きな力が働いても大きく湾曲し破損することなく力を吸収することができる。このリンクは上図で表されるような形をしており, Fig. 13 と同様に長さ方向にコンプライアンスを持つ。カーボンファイバを他の材料に変えることで様々な弾性・粘性が実現できる。

サイバネティック・ショルダは式 (38) のように 3 自由度のコンプライアンスを持つ機構となる。Fig. 11 と同様に, サイバネティック・ショルダのコンプライアンス楕円体を Fig. 15 に示す。この図では Fig. 16 の姿勢に対して $110[\text{mm}]$ と $168[\text{mm}]$ の模擬的な腕を取り付けた。サイバネティック・ショルダは集中型コンプライアンスを持ち, 前述のようにほぼすべての場所と同様のコンプライアンスを持つが, コンプライアンス楕円体は平らに近い三次元楕円体になる。ただし, Fig. 3 の平板 D の面内に存在する力に対してはコンプライアンスを持たないことを確認している。

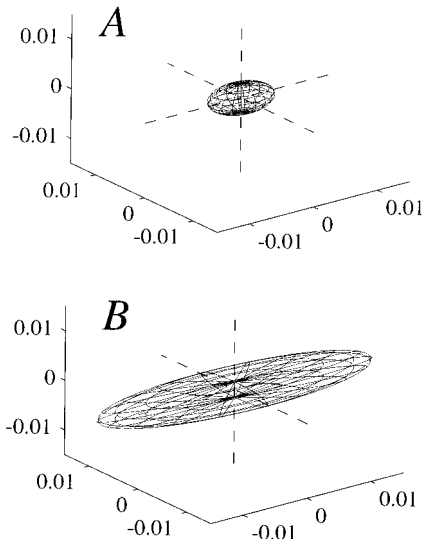


Fig. 15 Compliance ellipsoid of the cybernetic shoulder

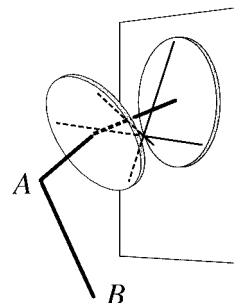


Fig. 16 Position of the cybernetic shoulder

6. おわりに

本論文では、人間型ロボットの肩機構に注目し従来の機構とは異なった3自由度機構として「サイバネティック・ショルダ」を提案し、以下の考察を行った。

- (1) サイバネティック・ショルダは閉リンク構造を持つ3自由度機構で、寸法が小さいこと・可動範囲が大きいこと・回転中心を一定としない人間らしい動きを実現すること・可動範囲内に特異点を持たないという特徴を持つ。
- (2) ヒューマノイドは人間が多く存在する環境で動作するため、信頼性の高いパッシブコンプライアンスを必要とする。
- (3) 環境に存在する人間は様々な方向からヒューマノイドに衝突することが予想されるため、ヒューマノイドには多くの方向にコンプライアンスを持つ集中型コンプライアンスが必要である。
- (4) サイバネティック・ショルダは集中型コンプライアンスの導入が容易であり、閉リンク構造を持つことからコンパクトな設計での導入が可能であることを確認した。さらに、コンプライアンス空間の観点からサイバネティック・ショルダの集中型パッシブコンプライアンスではほぼ一様のコンプライアンス空間を持つことを確認した。

サイバネティック・ショルダの制御システムの設計、コンプライアンス楕円体の計算に東京大学工学系研究科の星野慎一郎氏の多大な協力を頂いた。この研究は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFTF96P00801) の支援を受けた。

参考文献

- [1] 加藤一郎：“2足歩行ロボット (wabot-1) の開発”，バイオメカニズム 2。東京大学出版会，pp.173-174, 1973.
- [2] M.E. Rosheim: Robot Evolution: The Development of Anthropotics. JOHN & SONS, INC., 1994.
- [3] 井上博允：“重点領域研究「知能ロボット」：感覚と行動の統合化による機械知能の発現機構の研究”，人工知能学会全国大会，1995.
- [4] M. Inaba, T. Ninomiya, Y. Hoshino, K. Nagasaka, S. Kagami and H. Inoue: “A Remote-Brain Full-Body Humanoid with Multisensor Imaging System of Binocular Viewer, Ears, Wrist Force and Tactile Sensor Suit,” Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.2497-2502, 1997.

- [5] J. Yamaguchi and A. Takanishi: “Development of a Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using Non-linear Spring Mechanism,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.185-192, 1997.
- [6] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1997.
- [7] I.A. Kapandji: 関節の生理学。医歯薬出版 (株)，1996.
- [8] A. Lande and P.J. David: “Articulation for Manipulator Arm,” U.S. Patent 4,300,362, 1981.
- [9] W. Pollard: “Position Controlling Apparatus,” U.S. Patent 2,286,571, 1942.
- [10] J.P. Trevelyan: “Skills for a Shearing Robot: Dexterity and Sensing,” Robotics Research, pp.273-280, 1985.
- [11] 吉川，桐山：“ロボットアームの4関節手首機構”，計測自動制御学会論文集，vol.21, no.5, pp.533-535, 1985.
- [12] M. Roshime: “In the Footsteps of Leonardo,” IEEE Robotics & Automation Magazine, pp.12-14, 1997.
- [13] 大泉，大島：“球面リンクを用いた手首関節機構に関する研究”，日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集，pp.25-30, 1991.
- [14] 八木，大友，大泉，熊谷，服部：“球面連鎖を用いた関節機構に関する研究 (第7報：試作第3号機の製作)”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集，1C12-4, 1998.
- [15] T. Morita, K. Shibuya and S. Sugano: “Design and Control of Mobile Manipulation System for Humanoid Symbiotic Humanoid: Hadaly-2,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1213-1320, 1998.
- [16] T. Morita and S. Sugano: “Design and Development of a new Robot Joint using a Mechanical Impedance Adjuster,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2469-2475, 1995.
- [17] T. Morita and S. Sugano: “Development and Evaluation of Seven-D.O.F. MIA Arm,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.462-467, 1997.
- [18] 兵頭，小林：“非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究”，日本ロボット学会誌，vol.11, no.8, pp.1244-1251, 1993.
- [19] 大鐘，兵頭，小林：“非線形バネ要素を持つ7自由度腱制御アームの機構と制御”，日本ロボット学会誌，vol.14, no.8, pp.1152-1159, 1996.
- [20] R.A. Brooks: “Using Human Development As A Model For Adaptive Robotics,” Robotics Research (The Eight International Symposium), pp.339-343, 1998.
- [21] MIT AI Lab. URL: Cog's Arm; <http://www.ai.mit.edu/projects/cog/lex/cogs-arm.html>



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1969年3月21日生。1992年3月京都大学工学部精密工学科卒業。1994年3月同大学大学院修士課程 (応用システム科学専攻) 修了。1996年9月同大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。1996年10月日本学術振興会特別研究員 (PD)。1997年2月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト (日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究員)。2000年4月同大学大学院工学系研究科講師となり現在に至る。ヒューマノイドロボット，ロバスト制御の研究に従事。システム制御情報学会，計測自動制御学会，IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



中村仁彦 (Yoshihiko Nakamura)

1954年9月22日生。1977年京都大学工学部精密工学科卒業。1982年同大学大学院博士課程退学。同年より87年まで同大学助手。1987年より91年3月までカリフォルニア大学サンタバーバラ校助教，準教授。同年4月より東京大学工学部機械情報工学科に勤務，現在教授。工学博士。運動学的冗長性，閉リンク機構の駆動冗長性，複数のロボット機構の協調，宇宙ロボットの制御，非ホロノミックな拘束を受ける機械の運動制御，外科手術用ロボットなどに興味をもつ。計測自動制御学会，システム制御情報学会，日本機械学会，日本コンピュータ外科学会，IEEE，ASMEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)