

周波数特性の上限・下限を与える ハイブリッドコンプライアンス H_∞ 設計法

—ヒューマノイド・肩部コンプライアンスの整形と制御—

岡田 昌史^{*1} 中村 仁彦^{*1*2} 星野 慎一郎^{*3}

H_∞ Design of Hybrid Compliance using Upper/Lower Bound in the Frequency Domain — Shaping and Control of Dynamic Compliance of Humanoid Shoulder Mechanisms —

Masafumi Okada^{*1}, Yoshihiko Nakamura^{*1*2} and Shin-ichiro Hoshino^{*3}

Design and control of mechanical compliance would be one of the most important technical foci in making humanoid robots really interactive with the humans. For task execution and safety insurance the issue must be discussed and offered useful and realistic solutions. In this paper, we propose a theoretical design principle of mechanical compliance. Passive compliance implies mechanically embedded one in drive systems and is reliable but not-tunable in nature, while active compliance is a controlled compliance and, therefore, widely tunable, but less reliable specially in high frequency domain. The basic idea of this paper is to use active compliance in the lower frequency domain and to rely on passive compliance in the higher frequency. H_∞ control theory based on systems identification allows a systematic method to design the hybrid compliance in frequency domain. The proposed design is applied to the shoulder mechanism of a humanoid robot. Its implementation and experiments are to be shown with successful results.

Key Words: H_∞ Control, Hybrid Compliance, Humanoid Robot, Frequency Dependent Dynamic Compliance

1. はじめに

ヒューマノイドロボットが人間と空間・環境を共有するとき、コンプライアンスを持つことが必要となる。状況に応じてコンプライアンスを変化させ、技能を発揮する機能が重要となる。ロボットがコンプライアンスを持つ方法は、機械的な柔らかさによるパッシブコンプライアンスと制御によるアクティブコンプライアンスに大別される。前者はすべての周波数帯域で機能するが変更が難しい。後者はコンプライアンス制御として古くから研究がなされてきた [1]~[6]。アクティブコンプライアンスはヒューマノイドに要求されるコンプライアンスのプログラム性に富むものの、センサの分解能や雑音、サンプリングタイム、アクチュエータのパワー不足などのハードウェア上の問題により高周波数帯域でのロバスト性に実装上の技術的課題がある。アクティブコンプライアンスによってヒューマノイド・コンプライアンスを希望の形に整形することは重要な技術的課題である。

コンプライアンスの整形問題について論じる。手先に力が働くとき、この外力 f から手先のひずみ Δy までの伝達関数 G_{yf} を考える。この系 G_{yf} のゲイン特性は単位振幅周期力と周期ひずみの比率を表しているの、周波数領域で表現されたコンプライアンスであり、ここではこれをダイナミックコンプライアンスと呼ぶ [7]。Fig. 1 の破線で示されるコンプライアンス特性を、例えば実線のようなコンプライアンス特性に整形したい場合、これをパッシブコンプライアンスのみで実現することはきわめて困難である。一方、アクティブコンプライアンスのみによる実現、つまりコンプライアンス制御により破線の特性

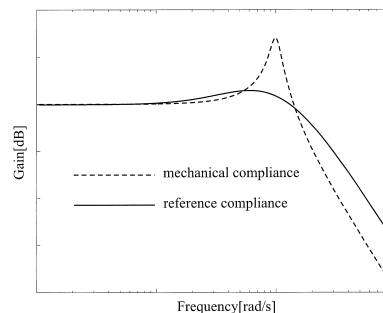


Fig. 1 Shaping dynamic compliance

原稿受付 2000年6月16日

^{*1} 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻

^{*2} 科学技術振興事業団

^{*3} NTT データ

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

^{*2} Japan Science and Technology Corporation

^{*3} NTT DATA Corporation

をフィードバックによって実線の特性に一致させることは高周波数帯域でのハイゲイン化によってシステムを不安定にする傾向がある．そのため、これら二つのコンプライアンス実現法の長所を生かし互いの短所を補うような設計法が必要であろう．

筆者らはこれまでに人間的な動きを持つ機構としてサイバネティック・ショルダを提案した [8]．これはヒューマノイドのための肩の 3 自由度機構であり、閉リンク構造を持つことで

- (1) 可動範囲が大きい
- (2) 可動範囲内に特異点が存在しない
- (3) 回転中心を一定としない人間らしい動きを実現する
- (4) 一部のリンクにコンプライアンスを持たせることでパッシブコンプライアンスが実現できる

といった特徴を持っている．

本研究では、サイバネティック・ショルダを用いた上半身型ヒューマノイドロボット [9] に対して (4) の特性を生かし、アクティブコンプライアンスとパッシブコンプライアンスのそれぞれの長所を生かす設計論の構築を目指す．

ここでは周波数領域で設計論を展開するために H_∞ 制御理論 [10] を用いる． H_∞ 制御理論をロボットの制御に応用した先駆的な研究 [11] ~ [15] では H_∞ 制御則によりロバスト安定化と外乱に対する感度低減化を行い、フレキシブルアームなどの高次振動モードに対する安定性の保証、目標値追従性の向上を目的としている．本論文では

- (I) H_∞ 制御則が周波数領域での補償器設計法である利点を生かし、パッシブ・アクティブコンプライアンスの役割分担を考えた設計法を与え、
- (II) 希望のコンプライアンスを一意に与えるのではなく、 H_∞ ノルムの評価を行う特徴を利用して周波数領域で上限と下限の幅を持ったもの (Fig. 2 斜線の領域) として与えることで、実現性の高い低次の補償器を容易に計算する方法を確立する．

先行した研究では、三平らが冗長自由度を持つシステムの役割分担を周波数領域で分離した H_∞ 補償器設計法がある [16] ~ [18]．これは冗長自由度間での動作を低周波数帯域で分担するものと高周波数帯域で分担するものに明示的に分けて設計しようというものである．また、佐野ら [19] は H_∞ 制御則を用いてマスタ・スレーブシステムのインピーダンスマッチングを行っているが、パッシブコンプライアンスの利用や上限・下限を与えることによる実現容易さを考慮した目標コンプライアンスの

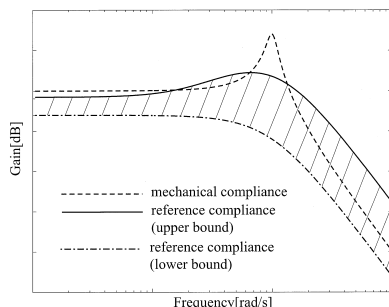


Fig. 2 Shaping dynamic compliance

設定については議論が成されていない．

2. パッシブコンプライアンス

2.1 サイバネティック・ショルダとそのコンプライアンス

筆者らはこれまでにサイバネティック・ショルダを提案した [8]．この概略図を Fig. 3 に示す．この機構はヒューマノイドの肩の 3 自由度機構であり、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 [20] 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 を中心の固定軸として 2 方向に倒れる． z 軸方向の回転はモータによって C を回転させ、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 とリンク E を介することで円盤 D に伝える．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 の長さの拘束によって決定される．

点 β, δ はジンバル機構であるためそれぞれの回転 $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{41}, \theta_{42}$ を Fig. 4 のように定義すると、上述のリンク E による拘束は次式で表される．

$$\left| \left(I - R_{\theta_{21}}^y R_{\theta_{22}}^x L_{l_3}^z R_{\theta_{41}}^x R_{\theta_{42}}^y R_{\pi}^z \right) R_{\frac{2}{3}\pi(i-1)}^z r \right| = l_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$r := [|b| \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (2)$$

ただし、 R_{θ}^{ξ} は ξ 軸まわりの θ 回転を表し、 L_l^{ξ} は ξ 軸に沿った l の平行移動を表す．また、 l_i はそれぞれのリンク E の長さを意味し、 $|b|$ は円盤 B, D の半径である．さて、リンク E が弾性を持つとする．このとき式 (1) を l_1, l_2, l_3 でそれぞれ偏微分すると

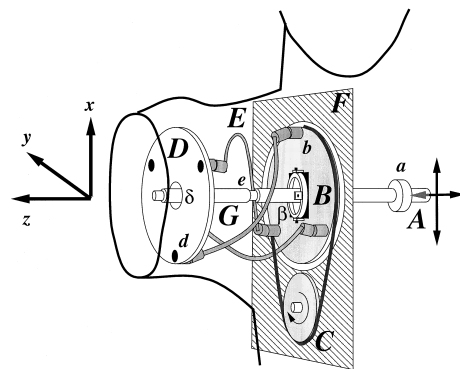


Fig. 3 Cybernetic shoulder

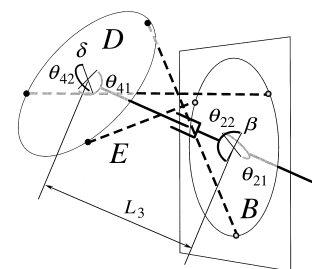


Fig. 4 Definition of rotations

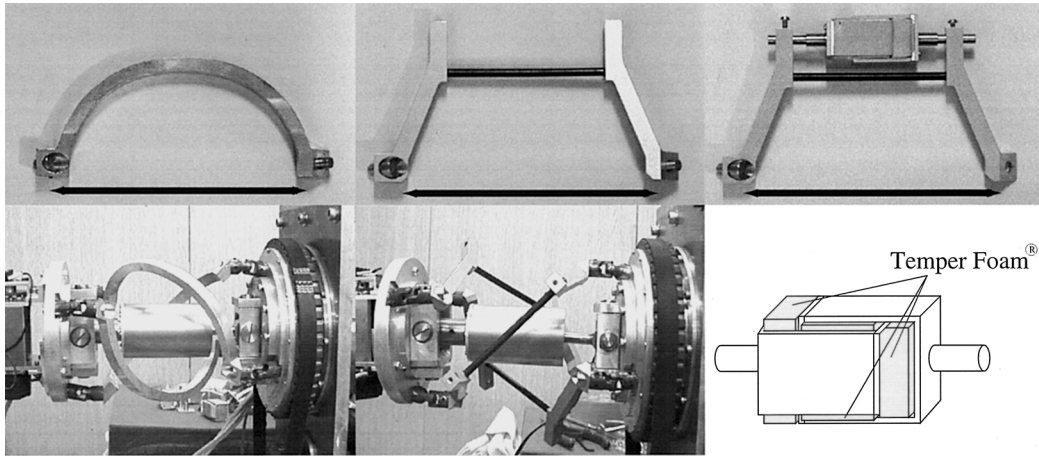


Fig. 5 The cybernetic shoulder with the rigid or elastic link

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{41} \\ \Delta\theta_{42} \\ \Delta L_3 \end{bmatrix} = J_s(\theta_{21}, \theta_{22}) \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

の関係が得られる。これはリンク E の微小変化 Δl_i に対する $\theta_{41}, \theta_{42}, L$ の変化量を表している。このヤコビ行列 J_s を用い、それぞれのリンク E の長さ方向のばね定数を k_1, k_2, k_3 とすると肩先の $\theta_{41}, \theta_{42}, L_3$ 方向のコンプライアンス行列 C_s は

$$C_s = J_s \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}^{-1} J_s^T \quad (4)$$

で与えられる。これにより、リンク E のコンプライアンスを変化させることで手先の回転 θ_{41}, θ_{42} 、位置方向 L_3 のコンプライアンスの計算・設計が可能となる。

2.2 弾性リンクの設計

サイバネティック・ショルダのリンク E として、Fig. 5 で表される三つを設計した。

- (1) 硬いリンク：断面積 7×10 [mm²]、ジュラルミン製 (Fig. 5 左)
- (2) 柔らかいリンク： $\phi 5$ [mm]、カーボンファイバ製 (Fig. 5 中)
- (3) 粘性を持つ柔らかいリンク：(2)のリンク+ダンパ (Fig. 5 右)

特に (3) に関しては振動吸収材としてテンパフォームを用いた。この材質は早い動きに対しては硬くなり、緩慢な動きに対しては柔らかくなるという非線形な粘性特性を持ったものである。これを Fig. 5 右のように用いることでリンクの振動吸収材として用いた。

式 (1) のように、このリンクは長さ方向の拘束を与えるため Fig. 5 における矢印方向の弾性・粘性がシステムのコンプライアンスに影響を与える。そこで、リンクのこの方向のばね定数・粘性摩擦係数を測定した。ばね定数は数種類の重りをリンクにつるし、伸びをレーザ位置計測器で測定することで求めた。粘性摩擦係数は振動の時間応答を計測し減衰率から求めた。測定した結果を Table 1 に示す。カーボンファイバを用いること

Table 1 Spring constant and coefficient of viscosity

Type	Spring constant [N/m]	Coefficient of viscosity [kg/s]
1	1.609×10^3	0.625
2	5.963×10^2	0.45
3	5.963×10^2	1.05

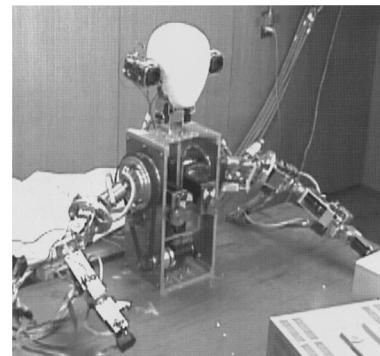


Fig. 6 Humanoid robot

で柔らかなリンクが設計でき、さらにダンパを用いることで適度な粘性が得られている様子が理解できる。

2.3 ヒューマノイドのコンプライアンス

次に、サイバネティック・ショルダに上述のリンクを用いて Fig. 6 に示される上半身型ヒューマノイドロボットを構成し手先のパッシブコンプライアンスを計測した。絶対座標における手先の位置・姿勢の六つのパラメータの値を計測することは難しいため、ここでは z 方向 (鉛直方向) のひずみにのみ注目し、これを観測量とする。また、簡単のためヒューマノイドの姿勢に関しても各軸 PD 制御によって関節角をある特定の値に固定した。前節のリンク 1, 2, 3 を用いた場合の手先の振動特性を調べた。実験装置の概略を Fig. 7 に示す。腕に 1 [kg] の重りを下げた状態からこれを静かに離すことで外力を与え、手先の振動をレーザ位置計測器によって計測した。このときの手先位置は

$$\begin{bmatrix} {}^e x_0 & {}^e y_0 & {}^e z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 400 & -300 & 270 \end{bmatrix} \text{ [mm]} \quad (5)$$

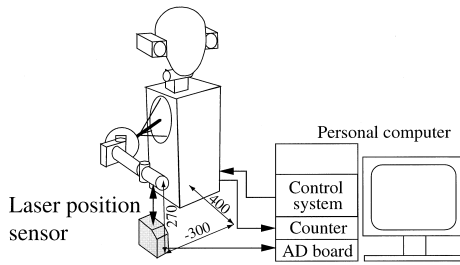


Fig. 7 Experimental setup

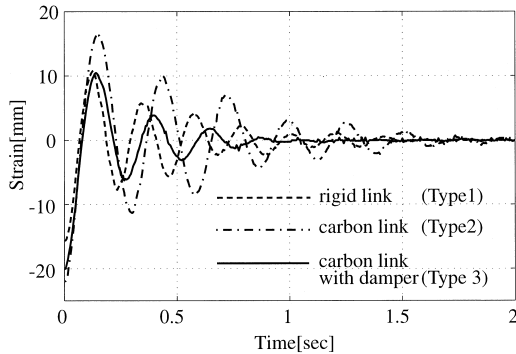


Fig. 8 Step responses of the strain

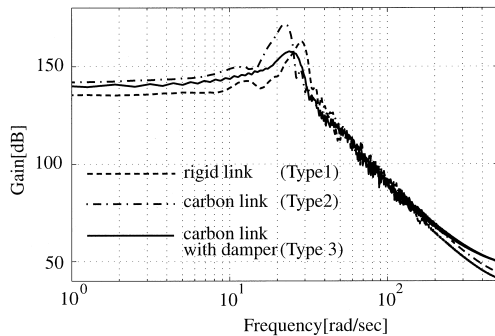


Fig. 9 Frequency analysis

である。振動のグラフ，時系列信号のスペクトル解析結果をそれぞれ Fig. 8, 9 に示す。ただし，スペクトル解析では時系列信号を微分してインパルス応答に変換し，さらにローパスフィルタ $W_f(s)$

$$W_f(s) = \frac{100^4}{(s + 100)^4} \quad (6)$$

を用いて雑音の影響を低減化した。カーボンファイバを用いることで柔らかな腕が設計でき，またダンパを付加することで高い粘性が得られている。タイプ3のリンクでは 25 [rad/s] 前後の周波数帯域に固有振動を持っている。

3. コンプライアンスの H_∞ ハイブリッド設計

3.1 H_∞ 制御問題 [9]

一般化制御対象

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

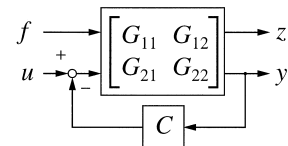


Fig. 10 Generalized control system

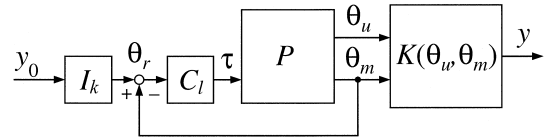


Fig. 11 Local feedback system

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ u \end{bmatrix} \quad (8)$$

z : 制御量 y : 観測量
 f : 外乱入力 u : 制御入力

に対して，Fig. 10 のように補償器 C を設計することを考える。このとき，図の閉ループ系における f から z への伝達関数 G_{zf}

$$G_{zf} = G_{11} - G_{12}(I + CG_{21})^{-1}CG_{21} \quad (9)$$

に対して， H_∞ 制御問題は，

$$\|G_{zf}\|_\infty < 1 \quad (10)$$

を満たす補償器 C を設計する問題である。ただし， $\|\cdot\|_\infty$ は H_∞ ノルムであり，

$$\|G(s)\|_\infty := \sup_{0 < \omega < \infty} |G(j\omega)| \quad (11)$$

で定義される。

このように H_∞ 制御は周波数領域でのゲインの上限を与える補償器設計法であり，この特性を利用してロバスト安定性の評価が可能となっている。本論文ではこの特性を利用して，希望のコンプライアンス特性の上限と下限を与える。また，その範囲での制約を満たしながら閉ループ系のバンド幅を定めて低周波数帯域だけで制御を行うロバスト補償器の設計法を示す。以下では，ヒューマノイドロボットのコンプライアンスを実現する補償器の設計に関して，一般化制御対象およびその周波数重みの考えを基礎にする。

3.2 補償器の設計

3.2.1 補償器の構成と設計仕様

いま，ヒューマノイドを制御対象 P とし， P が Fig. 11 のように補償器 C_l のローカルなフィードバックによって安定化されているときを考える。ここで，制御対象 P はモデル化される部分とモデル化されない部分に分けられ，その出力が θ_m ， θ_u である。パッシブコンプライアンスを持つヒューマノイドではパッシブな部分がモデル化されない部分に相当し，そのコンプライアンスによって生じるリンクなどのたわみが θ_u に相当する。 θ_m はモデル化され観測が可能のため C_l でフィードバッ

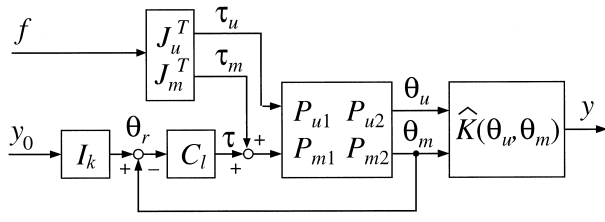


Fig. 12 Disturbance input

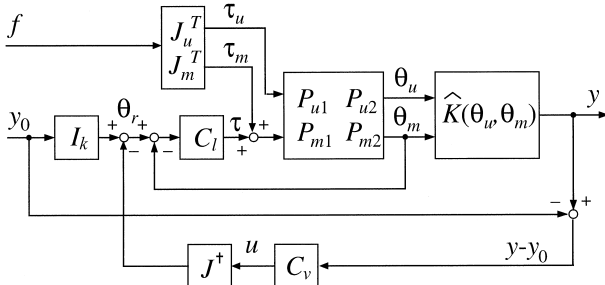


Fig. 13 Vibration control system

クされるが、 θ_u は観測されない。 y_0 は手先位置・姿勢の目標値、 y は実際の手先位置・姿勢、 θ_r は関節角度 θ_m の目標値、 τ はアクチュエータの出力するトルクである。 K 、 I_k はそれぞれ順運動学、逆運動学を表す作用素である。

手先に外力 f が働く場合を考える。 f による変位は十分小さいとすると、この外力は Fig. 12 のブロック線図として表される。ここで、 J_u 、 J_m は手先の位置・姿勢 y を用いて

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} J_u & J_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_u \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

で表されるヤコビ行列であり、制御対象 P は

$$\begin{bmatrix} \theta_u \\ \theta_m \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau + \tau_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P := \begin{bmatrix} P_{u1} & P_{u2} \\ P_{m1} & P_{m2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

のようにモデル化されない部分 P_{u1} 、 P_{u2} とモデル化される部分 P_{m1} 、 P_{m2} に分解した。また、変位は十分小さいという仮定から K を \hat{K} とし、局所的な領域での運動学作用素とした。このときの f から y までの伝達関数を

$$y = G_{yf}^{open} f \quad (15)$$

とおく。これは、パッシブコンプライアンスのみによるヒューマノイドのダイナミックコンプライアンスを意味する。

この閉ループ系に対して、Fig. 13 に表されるような振動制御用補償器 C_v を設計する問題を考える。これは目標値 y_0 と視覚センサや速度センサ等によって計測される実際の手先の位置・姿勢 y の誤差をフィードバックで制御する補償器である。ただし、手先の歪みは十分小さいことから $|y - y_0| \ll 1$ を仮定しており、 $[\cdot]^\dagger$ は一般化逆行列を意味する。このときの f から y までの伝達関数を

$$y = G_{yf}^{close} f \quad (16)$$

とおく。これは式 (15) にアクティブコンプライアンスを付加したときの、ヒューマノイドのコンプライアンス特性であり、 G_{yf}^{close} のゲイン特性を整形することで望みのコンプライアンス周波数特性を得ることができる。

Fig. 13 のブロック線図において、 $C_v = 0$ とすると

$$\Delta y := y - y_0 \quad (17)$$

は次式で表される。

$$\Delta y = \hat{K}(\theta_u, \theta_m) G \begin{bmatrix} f \\ y_0 \\ u \end{bmatrix} - y_0 \quad (18)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_s G_m & G_t I_k & -G_t J^\dagger \\ G_u - P_{u2} C_l G_s G_m & P_{u2} C_l G_s I_k & -P_{u2} C_l G_s J^\dagger \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$G_s := (I + P_{m2} C_l)^{-1} \quad (20)$$

$$G_t := I - G_s \quad (21)$$

$$G_u := P_{u1} J_u^T + P_{u2} J_m^T \quad (22)$$

$$G_m := P_{m1} J_u^T + P_{m2} J_m^T \quad (23)$$

I : 単位行列

このとき、式 (18) の右辺における y_0 に関する項は C_l の特性に依存する項であり、自重によるたわみなどの項を表している。これは f 、 u とは独立であり、ヒューマノイドのある特定の姿勢を考えることで、手先の振動を制御する補償器 C_v の設計に対する考察では無視できる。そこで、式 (18) を

$$\Delta y = \begin{bmatrix} \bar{G}_f & \bar{G}_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ u \end{bmatrix} \quad (24)$$

で簡略化して表記する。

次に補償器 C_v の設計仕様を与え、 C_v 設計のための一般化制御対象を導出する。 C_v の設計方針は 1 章より次の 2 点が挙げられる。

- (1) 1 章 (I) の考察のもと、アクティブコンプライアンスは低周波数帯域のみで動作し、補償器が有効に働きにくい高周波数帯域ではパッシブコンプライアンスの特性のみを用いる。これはロバスト安定性に関連する。
- (2) 補償器 C_v によってコンプライアンスの周波数特性を設計する。すなわち G_{yf}^{close} を希望の特性に設計する。実現可能な補償器の次数とロバスト性を考慮して適切な G_{yf}^{close} を与えるのは極めて困難である。そこで、1 章 (II) の考察のもと、この問題の緩和のため、希望の周波数特性の上限と下限を与え、制約に自由度を持たせたものにする。

3.2.2 一般化制御対象

これらの仕様より、補償器 C_v 設計のための一般化制御対象を Fig. 14 のように定めた。ただし、 W_1 、 W_2 、 W_3 は周波数重みである。Fig. 14 の一般化制御対象に基づいて設計された補償器 C_v では f から z_1 までの評価により、閉ループ系の H_∞

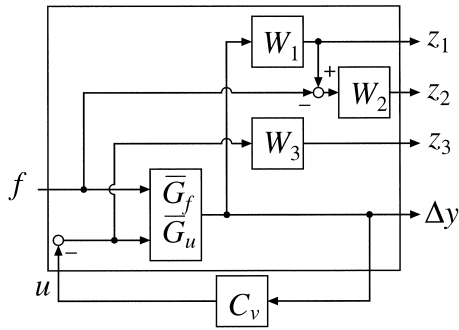


Fig. 14 Generalized control system for design of C_v

ノルムが 1 未満で設計されるため

$$|G_{yf}^{close} W_1| < 1 \quad (25)$$

がほぼすべての周波数帯域で満たされ、

$$|G_{yf}^{close}| < |W_1^{-1}| \quad (26)$$

の評価が行える。すなわち、 W_1^{-1} がコンプライアンスの上限を与える。さらに、 f から z_2 までの評価により

$$\|W_2 (I - G_{yf}^{close} W_1)\|_\infty < 1 \quad (27)$$

の関係から、

$$|G_{yf}^{close}| > |W_1^{-1}| - \frac{|W_1^{-1}|}{|W_2|} \quad (28)$$

の評価が行え、 W_2 を大きく取れば

$$W_1^{-1} \simeq G_{yf}^{close} \quad (29)$$

が満たされる。これは W_1, W_2 でコンプライアンスの下限を与えることを意味する。 f から z_2 までの評価は上限も与えるが、ここでは上限と下限をそれぞれ独立に与えることを目的として z_1, z_2 の二つの評価を行った。二つの評価を行っても得られる補償器の次数は増加しない。 f から z_3 までの評価は

$$\|W_3 (I + C_v \bar{G}_u)^{-1} C_v \bar{G}_f\|_\infty < 1 \quad (30)$$

の評価を行っており。これは W_3 によって閉ループ系のバンド幅に制約を与える。 W_3 を高周波数帯域で大きくすることでバンド幅を低くする。 W_1 によって上限を、 W_1, W_2 によって下限を与えその範囲で式 (30) を満たすロバストな補償器が設計される。

4. 実装と実験

4.1 制御対象の設定

絶対座標における手先の位置・姿勢六つのパラメータのうち鉛直方向のみに注目し、これを観測量とする。また、簡単のためロボットの姿勢は関節角をある特定の値に固定し、その近傍のコンプライアンスを議論する。このとき P が線形システムとして扱え、またヤコビ行列も定数行列となる。Fig. 14 における f, u, y はスカラー関数となる。

4.2 システム同定

振動制御用補償器 C_v の設計は Fig. 14 の一般化制御対象に基づいて行われるため制御対象 \bar{G}_f, \bar{G}_u のモデルが必要となる。ここでは、これをシステム同定によって求める。 \bar{G}_f は Fig. 8 の応答から求めた。 \bar{G}_u の同定では u から Δy までの閉ループ系全体を一つのシステムとして同定した。これにより、計算機やモータのドライバなどのハードウェアも含めたトータルなシステムとしてのモデルが得られる。

\bar{G}_u の同定のための入力信号としては M 系列信号 [21] を用いた。このときの出力はレーザ位置計測器によって測定した。レーザ位置計測器の分解能は 0.125 [mm] である。 \bar{G}_u の入出力信号から五次の OE (Output Error) モデル [21] を求め、これを二次に低次元化することで \bar{G}_u のモデル \bar{G}_u^m を得た。また、 \bar{G}_u と \bar{G}_f は共通の分母多項式を持つため、これに注意しながら Fig. 8 の結果より \bar{G}_f のモデル \bar{G}_f^m を ARX モデル [21] で同定し、これを連続時間システムに変換した。同定されたモデルは以下の式で表される。

$$\bar{G}_u^m = \frac{-1.47 \times 10^{-5}(s + 6975)(s + 34.7)}{(s + 2.76 + 23.8j)(s + 2.76 - 23.8j)} \quad (31)$$

$$\bar{G}_f^m = \frac{5.48 \times 10^{-2}(s + 26.7 + 135j)(s + 26.7 - 135j)}{(s + 2.76 + 23.8j)(s + 2.76 - 23.8j)} \quad (32)$$

周波数 $\omega = 23.8$ [rad/s] に固有周波数を持つ。

4.3 補償器の設計

Case 1 作業性の向上 (低コンプライアンス化)

式 (31) (32) の \bar{G}_u^m, \bar{G}_f^m を使い、Fig. 14 の一般化制御対象に基づいて補償器 C_v を設計した。このとき W_1, W_2, W_3 は

$$W_1 = \frac{7(s + 15)^3}{(s + 5)^2(s + 1000)} \quad (33)$$

$$W_2 = 0 \quad (34)$$

$$W_3 = \frac{290(s + 10)^3}{(s + 1000)^3} \quad (35)$$

とした。 W_1 は閉ループ系のコンプライアンスの周波数特性の上限を決めており、これは低周波数帯域ではコンプライアンスを小さく、さらに固有振動数での振動ピークを下げることを目的としている。ここでは、コンプライアンスの下限を与えても得られる特性には差はなかったため、 $W_2 = 0$ とした。 W_3 は閉ループ系のバンド幅を決定しており、高周波数帯域での補償器のゲインに制約を与える。

このとき得られた閉ループ系の特性を Fig. 15 に示す。補償器 C_v の存在していない開ループ特性 G_{yf}^{open} (○印) に対して、周波数重み W_1 の制約により補償器を用いた閉ループ系は G_{yf}^{close} (太い実線) となっている。 C_v を用いることで低周波数帯域のゲインを小さくすることができた。これは、定常的な外乱に対してコンプライアンスが低く、硬く設計されていることを意味する。また、振動モードのピークも小さくなり振動が素早く減衰する。これは補償器 C_v が低周波数帯域と振動モード付近で積極的に制御を行うことを示している。一方、 W_3 によって閉ループ系のバンド幅が決定される。高周波数帯域での

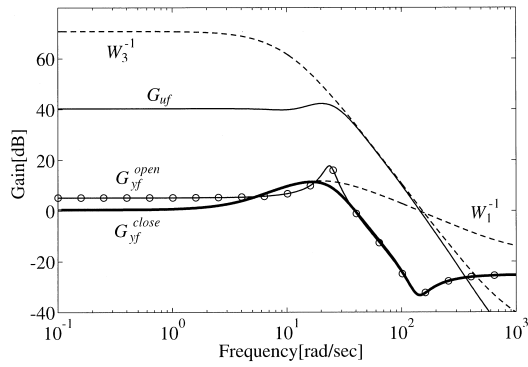


Fig. 15 Gain plots of closed loop systems (Case 1)

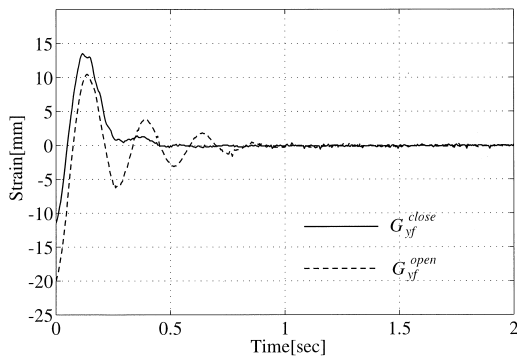


Fig. 16 Step responses of the controlled system (Case 1)

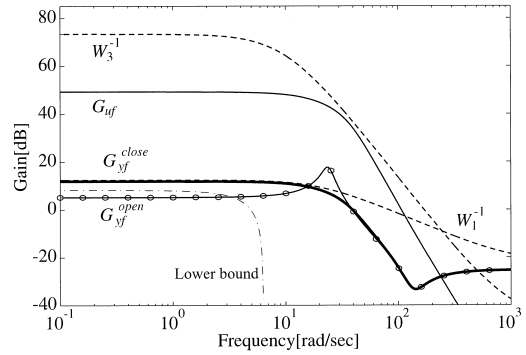


Fig. 17 Gain plots of closed loop systems (Case 2)

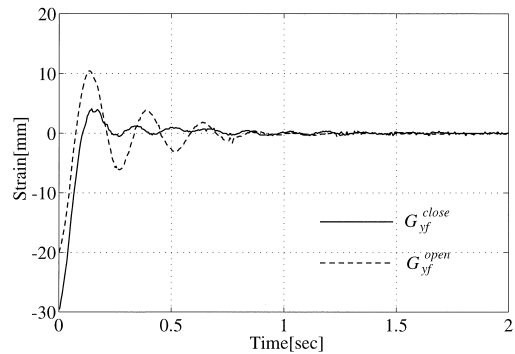


Fig. 18 Step responses of the controlled systems (Case 2)

補償器のゲインは小さくなるよう W_3 によって制限され、これにより高周波数帯域では G_{yf}^{open} と G_{yf}^{close} が一致している。これは補償器 C_v が高周波数帯域では動作しないことを示している。このように、 H_∞ 制御を用いて周波数領域で補償器を設計することにより 3.2.1 項での設計方針が満たされる補償器 C_v が設計できた。

設計した補償器 C_v を用いて Fig. 7 と同じ実験を行った。このときの手先のひずみを Fig. 16 に示す。Fig. 8 の制御されていないダンパ付きカーボンファイバリンク (G_{yf}^{open}) の振動を同時に示した。補償器 C_v によって初期値の値が小さくなり、約 2 倍の剛性が得られている。これは C_v によって低周波数帯域での補償がなされていることを示している。また、振動の減衰が大きくなっている。さらに、レーザ計測器の測定値には多くの雑音が存在するため、一般にフィードバックゲインを上げて剛性を高めることは困難を伴うことが多い。補償器 C_v は高周波数帯域での補償を行わないことから、この雑音に関するロバスト性に悩む必要がない。これは 3.2.1 項の設計仕様を満たすものである。なお、Fig. 16 の応答が Fig. 15 の特性に基づく数値計算結果とほぼ一致していることを確認している。

Case 2 安全性の向上 (高コンプライアンス化)

次に、以下の設計仕様のもとに補償器を設計した。

- 低周波数帯域で補償器 C_v によって高いコンプライアンスを与える。つまり、低周波数帯域で

$$|G_{yf}^{open}| < |G_{yf}^{close}| \quad (36)$$

とする。

- 固有周波数での最大ゲインを小さくする。
周波数重みを

$$W_1 = \frac{12(s+20)}{s+1000} \quad (37)$$

$$W_2 = \frac{65}{(s+5)^2} \quad (38)$$

$$W_3 = \frac{214(s+10)^3}{(s+1000)^3} \quad (39)$$

として、補償器を設計したときの閉ループ特性を Fig. 17 に示す。図の中の下限 (一点鎖線) は式 (28) に基づいて計算したものであり、上限は Case 1 と同様 W_1^{-1} で与えられる。

低周波数帯域における得られた閉ループ系のゲイン $|G_{yf}^{close}|$ (太い実線) はもとの特性 $|G_{yf}^{open}|$ (○印) より大きく、補償器を用いることでより高いコンプライアンスが得られている。この補償器を用いたときの応答を Fig. 16 と同様に Fig. 18 に示す。Fig. 18 では初期値がアクティブコンプライアンスを行わない場合よりも大きくなり、低周波数帯域で約 1.5 倍のコンプライアンスが得られている。これはコンプライアンス特性の下限を与えることで可能となったものである。

4.4 考察

本節では操作性の向上・安全性の向上を目指し、約 2 分の 1 の低コンプライアンス化・約 1.5 倍の高コンプライアンス化の二つの例を示した。これらの限界値に関して、サンプリングタイムやアクチュエータパワー、雑音の大きさなどのシステム固有の特性に依存するため一般的な議論は難しいが、実験におい

て以下の知見を得た。

- 大きな高・低コンプライアンス化を行えば、これはメカニカルに設定されたコンプライアンスを制御によって整形を大きく加えるため、大きなアクチュエータパワーが必要となる。そのため、閉ループ系のバンド幅は上がる傾向にあり、これはロバスト性の面からあまり望ましくない。これを避けるためには周波数重み W_1 に低周波数の極を設定し、低周波数帯域のコンプライアンスのみを整形する方法があるが、この場合閉ループ系 G_{yf}^{close} が低周波数の極を持ち、0 への収束が遅くなる。
- 特に過度の高コンプライアンス化を行う場合、機械的共振周波数のゲインを下げると補償器 C_v は低周波数帯域では大きなコンプライアンスを得るために正のフィードバックを行い、共振周波数では振動を打ち消すため負のフィードバックを行う。そのため、位相特性が大きく変化する周波数が存在する。これに閉ループ系のバンド幅の制約を与えることで、補償器 C_v は不安定極を持ちやすく、システムの安定性・安全性の面から好ましくない。
- 実験では 1 軸方向のコンプライアンスの実装を議論したが、システムのモデルが得られ、手先の位置・姿勢を視覚センサ・ジャイロセンサ・加速度センサなどによって計測することで多方向のコンプライアンスを設計することも可能である。特に、サイバネティック・シオルダは閉リンク構造を持つため、各リンク E のひずみを計測しなくても Fig. 4 の θ_{41}, θ_{42} の回転角、 L_3 の長さを計測することで手先の正確な位置を計測可能である。

ヒューマノイドに必要とされるコンプライアンスは作業目的・環境に依存する。そのため、状況に応じたコンプライアンスの設計を行うことが必要である。ここでは H_∞ 制御則を用いたアクティブコンプライアンス、弾性リンクによるパッシブコンプライアンスによる周波数特性の設計法を示した。コンプライアンスを適切に設計し、状況に応じて素早く変化させる技術が本研究の成果の上に構築されるべきである。これにより、将来は少ないアクチュエータパワーで速いボールを投げる、高くジャンプするといったヒューマノイドの設計も可能になると思われる。

5. おわりに

人間の存在する環境で動作するヒューマノイドにはその作業・環境に応じたコンプライアンスの周波数特性の整形が必要であり、その設計法を論じた。本研究の結論は以下の 4 点にまとめられる。

- (1) 高周波数帯域でアクティブ制御を行うことは、ロバスト安定性の面から望ましくない。コンプライアンス周波数特性の整形法として低周波数帯域ではアクティブ、高周波数帯域ではパッシブコンプライアンスを用いるハイブリッドコンプライアンスを提案した。
- (2) ハイブリッドコンプライアンスの補償器の設計では目標コンプライアンスを一意に与えるのではなく、コンプライアンス周波数特性の上限と下限を与えこの範囲の中でロバストな低次の補償器を設計することを提案し、 H_∞ 制御理論を用いて設計法を確立した。

- (3) サイバネティック・シオルダの閉リンク構造を与えるリンクに弾性要素とダンパを採用し、手先での適度なパッシブコンプライアンスを実現することを提案した。
- (4) サイバネティック・シオルダを持つ上半身型ヒューマノイドロボットを用いて、ハイブリッドコンプライアンスの実現可能性、設計法の有効性を実験により検証した。

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, 代表: 井上博允) の支援を受けた。

参考文献

- [1] R.P.C. Paul and B. Shimano: "Compliance and Control," Proc. of the 1976 Joint Automatic Control Conference, pp.694-699, 1976.
- [2] H. Hanafusa and H. Asada: "Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers," Proc. of the 7th International Symposium on Industrial Robots, pp.361-368, 1977.
- [3] N. Hogan: "Mechanical Impedance Control in Assistive Devices and Manipulators," Proc. of the 1980 Joint Automatic Control Conference, TA10-B, 1980.
- [4] J.K. Salisbury: "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, 1980.
- [5] N. Hogan: "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part 1~3," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [6] K.F. L-Kovitz, J.E. Colgate and S.D.R. Carnes: "Design of Components for Programmable Passive Impedance," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1476-1481, 1991.
- [7] 谷口修: 振動工学ハンドブック. 養賢堂, 1976.
- [8] 岡田, 中村: "サイバネティック・シオルダの設計と運動学的解析", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 (ROBOMEC'98), 1B12-3, 1998.
- [9] 岡田, 中村: "人間らしい動き・柔らかさを持つトルソーロボット", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 (ROBOMEC'99), 2P1-78-107, 1999.
- [10] K. Glover and J.C. Doyle: A State Space Approach to H_∞ Optimal Control, in Three Decades of Mathematical System Theory (H. Nijmeijer, J.M. Schumacher eds.). pp.179-218, Springer-Verlag, 1994.
- [11] 高柳, 申, 武藤, 田村: "2 自由度 D.D. マニピュレータのロバスト制御", 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.12, pp.1421-1426, 1993.
- [12] 服部, 佐野, 乙幡, 古荘: " μ -設計法を適用したマニピュレータの力制御", 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.29-32, 1993.
- [13] 章, 佐野, 仁科, 古荘: "ループ整形法によるマニピュレータの力制御", 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.51-52, 1994.
- [14] 松野, 笠井, 田中, 若城: "1 リンク・フレキシブル・アームのロバスト力制御", 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.7, pp.1011-1019, 1996.
- [15] 土井, 大須賀, 小野, 川谷: "2 次安定化による時変型 2 リンクビームのロバスト制御", 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.7, pp.1020-1026, 1996.
- [16] 三平, 伊藤, 美多: "冗長自由度を持つ制御対象の H_∞ 制御", 第 20 回制御理論シンポジウム資料, pp.101-104, 1991.
- [17] 伊藤, 小林, 三平, 劉, 美多: "2 重台車系の H_∞ 周波数分離制御—サーボ系の設計とフェーズを用いた動作解析—", 第 21 回制御理論シンポジウム資料, pp.121-126, 1992.
- [18] 三平満司: "周波数分離制御の応用範囲", 平成 5 年電気学会産業応用部門全国大会資料, pp.S-176-S-179, 1993.
- [19] 佐野, 田中, 藤本: " H_∞ 制御に基づくバイラテラル制御", 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.27-28, 1995.
- [20] M.E. Rosheim: Robot Evolution, The Development of Anthropotics. JOHN & SONS, INC., 1994.
- [21] L. Ljung: System Identification—Theory for the User.

Prentice-Hall, 1987.



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1969年3月21日生。1994年3月京都大学大学院工学研究科修士課程(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。2001年4月同大学大学院情報理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。82年京都大学大学院工学研究科精密工学科博士課程退学。同年より87年まで同大学助手。87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授, 準教授。同年4月より東京大学に勤務。現在同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授。工学博士。ロボットの運動学, 動力学, 制御, および知能の問題, 特に非ホロノミックロボット, 脳型情報処理, ヒューマノイドやCGの運動・力学計算, 外科手術用ロボットなどの研究に従事。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)



星野慎一郎 (Shin-ichiro Hoshino)

1976年5月25日生。1999年3月東京大学工学部機械情報工学科卒業。2001年3月同大学大学院工学系研究科修士課程修了(機械情報工学専攻)。現在, NTT データ勤務。