

1 まえがき

近年、人に変わり得る労働力としてのヒューマノイドロボットの利用に注目が集まっており、技術発展による運動性能が向上が目覚ましい。しかしながら、ヒューマノイドロボットは形状の制約上、変速機構にタイミングベルトを使わざるを得ず、その共振が低周波数に現れ、制御帯域が上げられないため、それ以上の運動性能の向上が難しい。それゆえ、プラントを変速機構のばね要素を考慮した2慣性系でモデル化し、共振抑制制御を導入する必要がある。モーションコントロールの分野において共振抑制制御は、ノッチフィルタ、共振比制御、自己共振相殺制御 (Self Resonance Cancellation Control, SRC) など数多く提案されているが、これらの手法はプラントのモデル化誤差にロバストではなく、姿勢変化によって慣性モーメント、遠心力、コリオリ力、重力、摩擦力などが時々刻々と変化するヒューマノイドロボットに対し、これらの手法をそのまま適用させることは難しい [1][2]。

一方で、ロボットの姿勢変化に依るモデル化誤差を全て外乱とみなし、プラントをノミナル化させ、モデル化誤差に対するロバスト性を高める制御手法として、外乱オブザーバ (Disturbance Observer, DOB) がある [3][4]。しかしながら、DOB は1慣性系のプラントをノミナル化させることはできるものの、これをそのまま2慣性系のプラントに適用すると、変速機構のばね要素と負荷慣性により大きな振動を誘発する。

以上の理由から、ヒューマノイドロボットのさらなる制御性能の向上には、2慣性系でモデル化したプラントのモデル変動にロバストな共振抑制制御が必要である。そこで、本論文では、負荷の粘性項を考慮した SRC と自己共振相殺外乱オブザーバ (Self Resonance Cancellation Control Disturbance Observer, SRCDOB) を併用した制御手法を用い、2慣性系のプラントのモデル化誤差にロバストな共振抑制制御をヒューマノイドロボットの脚において実現する。

2 3 関節脚ロボット

ロボット脚の制御設計の基礎検討をするために、3 関節脚ロボットを作成している。3 関節脚ロボットは、股関節、膝関節、足首関節の3つの関節を備えており、図1に示すように、モータからタイミングベルトを介してハーモニックギアと接続されている。このタイミングベルトが持つばね特性の影響で2慣性系でのモデル化が必要になっている。モータの慣性モーメント、モータの粘性減衰係数、負荷の慣性モーメント、負荷の粘性減衰係数、ばね定数をそれぞれ、 J_M, B_M, J_L, B_L, K 、ギア比を n とする。以下、添え字の n が付いたものは全てノミナル値とする。また、モータの角度を θ_M 、負荷側の角度を θ_L とする。

膝関節周りのモータ側トルク指令値 T_M からモータ側角度 θ_M までの周波数特性 P_{MM} の計測結果と、それをもとに行った2慣性系モデルのボード線図を図2に示す。

3 SRC と SRCDOB

自己共振相殺制御 (SRC) は、モータ側のみならず負荷側にもエンコーダを取付け、制御対象を1入力2出力系とし、2つのエンコーダ情報をフィードバックしたのに対し、ある係数をかけて足し合わせることで、SRC における見かけのプラントの共振を相殺する制御手法である。SRC は、ばね定数 K を用いずに設計できるので、ばね定数 K の変動にロバストである。SRC の設計法、および SRC の理論をもとに考案した SRCDOB の設計法を本章では論ずる。

3.1 自己共振相殺制御

従来の SRC では考慮されていなかった粘性項を考慮するために、まず SRC のブロック線図を図3の形に描き改める。 C_{FB} はフィードバックコントローラであり、自由に設計することが可能である。このとき、負荷側角度指令値 θ_L^{ref} から θ_L までの閉ループ伝達関数のノミナル値 G_{Cn} 、開ループ伝達関数のノミナル値 G_{On} は、

$$G_{Cn} = \frac{P_{LMn} \left\{ n \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) + \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) \right\} C_{FB}}{1 + P_{SRCn} C_{FB}} \quad (1)$$

$$G_{On} = P_{SRCn} C_{FB} \quad (2)$$

$$P_{SRCn} = P_{MMn} \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) + P_{LMn} \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) \quad (3)$$

となる。ここで、SRC における見かけのプラント P_{SRC} を SRC プラントと定義する。次に、SRC プラントのノミナル値 P_{SRCn} が、

$$P_{SRCn} = \frac{1}{s^2} \quad (4)$$

となるように $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を決定する。このとき、解は無数に存在するが、 K を用いずに各係数を選択すると、

$$\alpha = J_{Mn} \quad \beta = B_{Mn} \quad \gamma = \frac{J_{Ln}}{n} \quad \delta = \frac{B_{Ln}}{n} \quad (5)$$

となり、SRC プラントのノミナル値 P_{SRCn} に共振成分が存在しなくなる。最終的に、 C_{FB} は SRC プラントのノミナル値 P_{SRCn} に対して設計すれば良いことになる。さらに、モータの角度誤差 e_M と負荷の角度誤差 e_L を用いて、SRC 出力角度誤差 e_{SRC} を

$$e_{SRC} = \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) e_M + \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) e_L \quad (6)$$

と定義すれば、SRC は、SRC 出力角度誤差 e_{SRC} を 0 にするように働くことになる。

3.2 自己共振相殺外乱オブザーバ

自己共振相殺制御 (SRCDOB) の設計法を述べる。まず、式 (3) はノミナル値において議論しているが、実際にはモデル化誤差が生じるので、

$$P_{SRC} = P_{MM} \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) + P_{LM} \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) \quad (7)$$

となる。この両辺に $T_M s$ を乗じると、

$$T_M P_{SRC} s = T_M \{ P_{MM} (\alpha s + \beta) + P_{LM} (\gamma s + \delta) \} \quad (8)$$

⇔ $\dot{\theta}_{SRC} = \alpha \dot{\theta}_M + \beta \theta_M + \gamma \dot{\theta}_L + \delta \theta_L$

ここで、SRC 出力角度 θ_{SRC} を

$$\theta_{SRC} = T_M P_{SRC} \quad (9)$$

と定義している。SRC 出力角速度 $\dot{\theta}_{SRC}$ を用いて DOB を構成する。これを SRCDOB と名づける。SRC 推定外乱には共振成分が存在しないため、Q フィルタのカットオフ周波数を共振周波数より大きくすることができる。

さらに、 $Q \approx 1$ として見かけのモータトルク指令値 T'_M から SRC 出力角速度 $\dot{\theta}_{SRC}$ までの伝達関数を計算すると、

$$\frac{\dot{\theta}_{SRC}}{T'_M} = \frac{1}{s} = P_{SRCn} s \quad (10)$$

となり、式 (4) の SRC プラントのノミナル値と一致する。これは、SRCDOB によって SRC プラント P_{SRC} がノミナル化されることを示しており、ばね定数 K の変動にロバストな SRC と、SRC プラント P_{SRC} をノミナル化できる SRCDOB を併用すれば、 J_M, B_M, J_L, B_L, K という2慣性系の全パラメータ変動にロバストな制御系が構成できる。図4に SRC と SRCDOB を併用した制御系を示す。

3.3 SRCDOB によるノミナル化

本節では、負荷の慣性モーメントに $J_L = 2J_{Ln}$ なるモデル化誤差が生じたときに、SRCDOB によって SRC プラント P_{SRC} がノミナル化されることを確認する。図5に、 $1/s^2$ 、モデル化誤差が生じたときの P_{SRC} 、モデル化誤差が生じたときの P_{SRC} を SRCDOB でノミナル化したものの3つ伝達関数を示す。

図5より、SRCDOB を用いることで、負荷の慣性モーメント J_L に変動が生じた場合に、SRC プラント P_{SRC} がノミナル化され、共振がほとんど相殺されていることがわかる。若干共振が残っているが、これは $Q \neq 1$ であるため、 $\omega_Q \rightarrow \infty$ となると、完全に共振が相殺される。

4 軌道追従実験

本節では、PID と DOB を併用した制御系と、SRC と SRCDOB を併用した制御系において、実際にヒューマノイドロボットが足踏み動作を行う際の膝の角度を指令値として与え、軌道追従性能の比較を行う。本実験では、初めに初期姿勢へ持っていき、その後足踏みを2回行っている。また、同時に股関節及び足首も同時に動かしているため、その反動が外乱として加わっており、姿勢の変動があるため、モデル変動も加味されている。図6に指令値との誤差を示す。図6より、SRC と SRCDOB を併用した制御系の方が追従性が良いことが分かる。

5 あとがき

本論文では、粘性項を考慮した SRC の設計法と SRCDOB を提案した。また、それらを併用することで2慣性系のロバスト制御が実現可能であることを論じ、ヒューマノイドロボットに適用させ、シミュレーションおよび実験により有効性を示した。SRC と SRCDOB を併用した制御系は、PID と DOB を併用した制御系に比べ、フィードバック制御器の極 ω_C が $-30 \times 2\pi$ [rad/sec] から $-50 \times 2\pi$ [rad/sec] に、Q フィルタのカットオフ周波数 ω_Q が $15 \times 2\pi$ [rad/sec] から $600 \times 2\pi$ [rad/sec] に向上し、軌道追従の実験においても、SRC と SRCDOB を併用した制御器が PID と DOB を併用した制御器より優れていることを示した。

本手法は設計法が明確で、ヒューマノイドロボットだけでなく様々なアプリケーションにおいて適用が可能であり、本論文がモーションコントロールの性能向上の何らかの参考になれば幸甚である。

参考文献

- [1] K. Ohishi, N. Shimada, and T. Miyazaki: "High-performance robot motion control based on zero-phase notch filter for industrial robot", The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp.626 - 630, March 21-24, 2010, Nagaoka, Japan
- [2] K. Yuki, T. Murakami, and K. Ohnishi:"Vibration Control of a 2 Mass Resonant System by the Resonance Ratio Control", Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn. vol.113-D, no. 10, pp. 1162 - 1169, 1993.
- [3] K. Sakata, H. Fujimoto, and K. Saiki "Optimal mechanical parameter design using Self Resonance Cancellation control for gantry-type high precision stage", to be published in Proc. IEEE Industry Applications Society Conf. (JIASC 2011), (in Japanese).
- [4] K. Ohnishi: "New Development of Servo Technology in Mechatronics", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.107-D, no.1, pp.83-86, 1987. (in Japanese)
- [5] T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 38, pp. 363-368, Oct. 1991.

発表文献

論文誌

- [1] 青木元伸, 藤本博志, 堀洋一, 高橋太郎:「自己共振相殺制御と自己共振相殺外乱オブザーバを用いたロバスト共振抑制制御とそのヒューマノイドロボットへの適用」, 電気学会論文誌 D (査読依頼中)

国際学会

- [1]M. Aoki, H. Fujimoto, Y. Hori, T. Takahashi.: "Robust Vibration Suppression Control based on Self Resonance Cancellation Disturbance

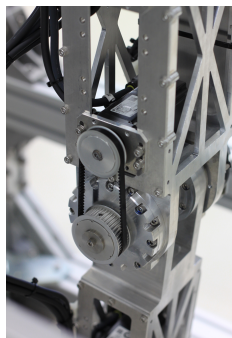


図 1: Composition of Transmission for Joint

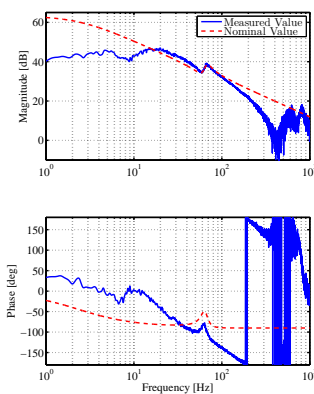


図 2: Bode Diagram for Knee Joint

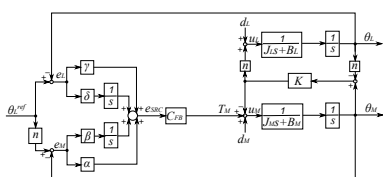


図 3: Block Diagram of SRC

Observer and Application to Humanoid Robot", IEEE International Conference on Mechatronics (Accepted)

国内学会

- [1]Motonobu Aoki, Yushi Seki, Takayuki Shiraishi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Taro Takahashi: "Vibration Suppression Control of Leg Joint with Timing Belt for Humanoid Robot", in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-12-118, 2012 (in Japanese).
- [2]Motonobu Aoki, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Taro Takahashi: "Robust Resonance Suppression Control of Humanoid Robot using Self Resonance Cancellation Control and Self Resonance Cancellation Disturbance Observer for n-inertia System", in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-12-179, 2012 (in Japanese)
- [3]Motonobu Aoki, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Taro Takahashi: "Robust Resonance Suppression Control of Humanoid Robot using Self Resonance Cancellation Control and Self Resonance Cancellation Disturbance Observer for n-inertia System", in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-13-023, MEC-13-023, 2013 (in Japanese).

表彰

平成 24 年 産業計測制御技術委員会 優秀論文発表賞
Motonobu Aoki, Yushi Seki, Takayuki Shiraishi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Taro Takahashi: "Vibration Suppression Control of Leg Joint with Timing Belt for Humanoid Robot", in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-12-118, 2012 (in Japanese).

特許

申請中

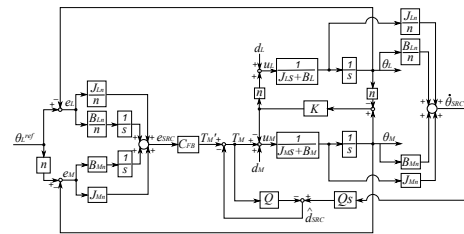


図 4: Block Diagram of SRC with SRCDOB

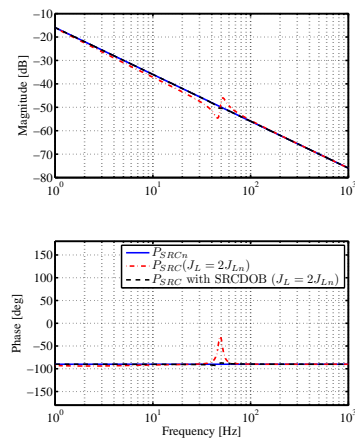


図 5: Bode Plot of P_{SRC}

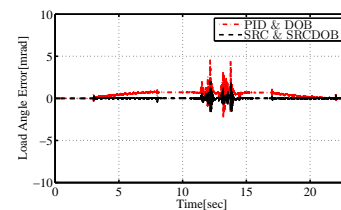


図 6: Orbit Following Experiment (Error)