

「硬くて柔らかい」人の運動特性を模したモータサーボ制御

‘Rigid, but flexible’ motor servo control mimicking human motion properties

2021015



研究代表者

大阪大学大学院 工学研究科

准教授

杉原 知道

〔研究の目的〕

人の傍で活動するロボットに求められる、環境や人との接触時における柔軟な応答と、人が恐怖を感じない滑らかな動作を示し、かつ作業遂行に十分な剛性と位置決め精度を与えるモータ制御技術の開発が本研究の目的である。

従来の産業用ロボットのほとんどは、人と隔絶され不確定要素が混入しない環境で、溶接や塗装など精密位置決め作業に用いられていた。このようなロボットに柔軟性や動きの滑らかさは必要ない。しかし今後、人と活動場所を共有し、時に協働するロボットが望まれたとき、柔軟かさや滑らかさは不可欠であり、同時に位置決め精度、剛性も依然必要である。

明らかに相反する二つの性質を両立する制御器の設計方法は自明ではないが、我々人はこれらを巧みに両立している。その鍵は、関節摩擦の小ささ、予測を用いた応答性向上の二点と考えた。これに基づいて本研究では、標準的な産業用ロボットで用いられ電磁モータと高減速比減速器で構成した関節に対し、インナーループにおいては負荷トルク情報とフィードフォワード・フィードバック制御を併用した摩擦補償を行い、アウターループにおいては2自由度制御により剛性と応答性を独立に調整することで、上述の特性を有した制御の実現を試みる。

〔研究の内容、成果〕

1. 実験機の構成

図1に、本研究で用いた実験装置を示す。コアレス DC モータ (maxon REmax-29) と、タイミングベルト・プーリ、ハーモニックドライブ減速器 (SHG-14-80-2UH) により減速比 1:120 としている。関節角度はインクリメンタルエンコーダによって取得し、これを差分して回転速度、回転加速度を近似的に得る。減速器出力軸には、スリット入り円盤を挟んでアルミニウム合金製のビームを取り付けている。スリット部にはフォトインタラプタ (ローム RPI-243) を取り付け、ビームの歪みを受光量変化として計測しトルクセンサとして用いる。制御は H8 マイコン上で行う。

モータの回路方程式および運動方程式がカップリングした支配方程式は、次のようになる。

$$J\ddot{\theta} = Ke - K_E \dot{\theta} - \tau_f(\theta) + \tau_L \quad (1)$$

ただし、 J は負荷慣性、右辺第1項は入力電圧、

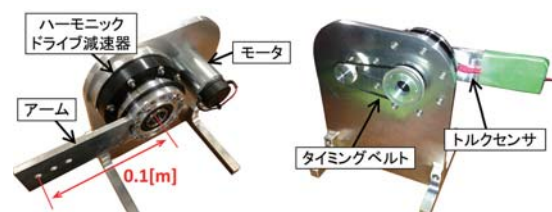


図1 実験用関節制御システム

第2項は逆起電力による粘性摩擦，第3項は機械摩擦，第4項は外界からの負荷トルク（外トルク）を意味する。

2. 減速器内部摩擦補償制御

式(1)において，第2項と第3項を併せた関節の摩擦特性を関節速度の関数として同定することで，これを補償する信号をフィードフォワードに推定できる。実験機において同定した摩擦特性を図2に示す。これによって大部分の摩擦は補償可能だが，第3項には関節速度のみからは推定できない静止摩擦が含まれる。フィードフォワード摩擦補償を施した下で外トルクを計測し，関節加速度に基づいて負荷慣性を推定すれば，それらの差として残留静止摩擦を推定しフィードバック補償することが可能である。ただし雑音の影響を除去するため，ローパスフィルタを施す必要がある。これは外乱オブザーバ[1]の応用である。残留静止摩擦は小さいので，トルクセンサに要求される精度や応答特性はそれほど高くなく，安価なフォトインタラプタを利用できる[2]。図3に，実測した

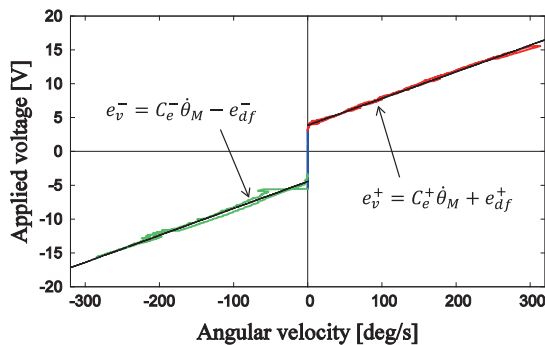


図2 同定された摩擦特性（関節速度－デューティ比）

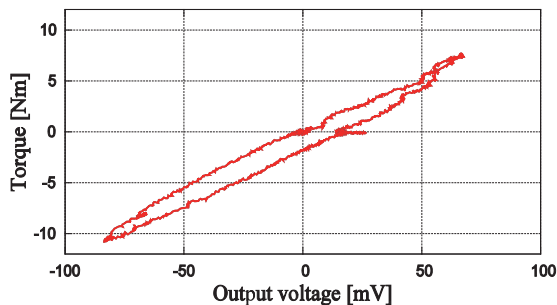


図3 トルクセンサ特性（出力電圧－印加トルク）

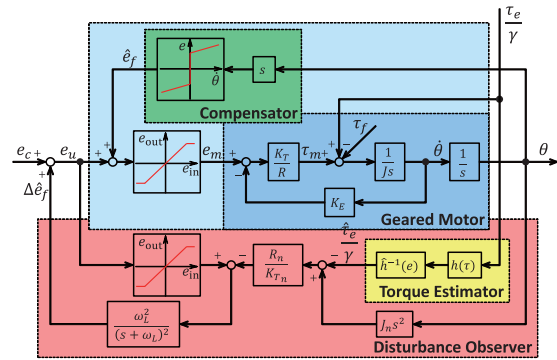


図4 摩擦補償制御系ブロック線図

フォトインタラプタ出力電圧と負荷トルクとの関係を示す。ヒステリシスが存在するが，おおむね線形関数によって近似できる。

以上を組み合わせで設計した摩擦補償制御系のブロック線図を，図4に示す。

3. 2自由度制御による応答性改善

摩擦補償によって，高減速比減速器を用いながらも外力に対し柔らかに応答させることが可能になった。一方，摩擦によって得られる位置決め精度を犠牲にした側面もある。サーボゲインを高くすることでこれを補うと，再び柔らかさを失ってしまう。そこで，サーボゲインはあまり高くせず，柔らかさを維持したまま，予測器によって目標値応答性を向上する2自由度制御系をアウターループとして設計した。制御系全体のブロック線図を図5に示す。なお，PID補償器内の積分補償器には，我々が先に開発した自動リセット機能付き積分補償器[3]を採用し，積分補償項の飽和によるwindup現象を原理的に防いでいる。

4. 実験・評価

提案した制御方法を評価するため，次の4つの条件について比較した。

- 摩擦補償なし
- フィードフォワード摩擦補償のみ
- フィードバック摩擦補償のみ
- フィードフォワード・フィードバック摩擦補償併用

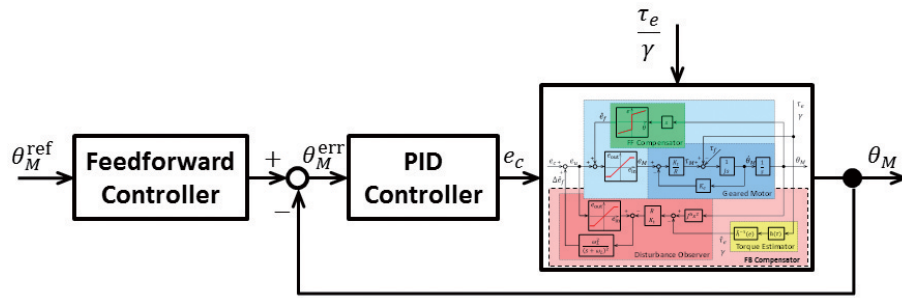


図5 2自由度サーボ制御系ブロック線図

各試行において、目標出力角度を 10.0° にステップ状に与えた後、外トルクをゆるやかに印加および急激に印加したときの挙動を調べた。計測されたトルク値および出力角度のグラフを図6に示す。(a)摩擦補償なしでは、目標値にも外トルクにもほとんど応答できていない。(b)フィードフォワード摩擦補償のみ用いた場合は、ある程度応答が改善されている。2自由度制御によりサーボゲインが小さいにもかかわらず目標値応答が良い。しかし収束性は悪く、長周期振動が起こっている。残留静止摩擦によりモータが停止すると、フィードバック制御器に含まれる積分補償項が累積され、あるところで静止摩擦に打ち勝つ偏差補償トルクが働く。目標値に近づくと補償トルクは低減し、再度静止摩擦により停止する。この繰り返しにより振動が生じると考えられる。(c)フィードバック摩擦補償のみの場合は、目標値応答、外乱応答

ともに改善されているが、(b)の結果に見られた振動よりも短い周期で振動が現れている。これは、外乱オブザーバ安定化のためのローパスフィルタが外乱の高周波信号への応答を防げていると考えられる。(d)提案方法であるフィードフォワード・フィードバック補償併用制御では、(c)で見られた振動は低減され、4条件中最も良好な結果を示した。しかし振動を完全に除去できてはいない。

上記の通り、外乱オブザーバ安定化のためのローパスフィルタで除去された周波数領域に振動源がある。原因として、タイミングベルトの振動、トルクセンサ雑音等が考えられる。対策は、低弾性タイミングベルトの使用、トルクセンサ推定精度の向上、制御周期の高速化が挙げられる。タイミングベルトの弾性変形を考慮した2慣性系としてモデルを立て直し、ベルト弾性を実機の10分の1に設定した条件でシミュ

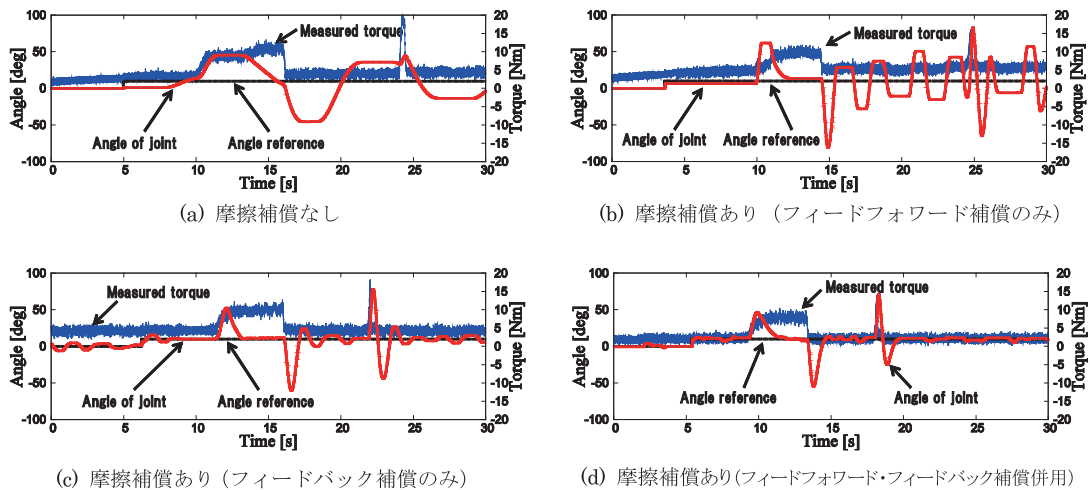


図6 摩擦補償制御の実験結果

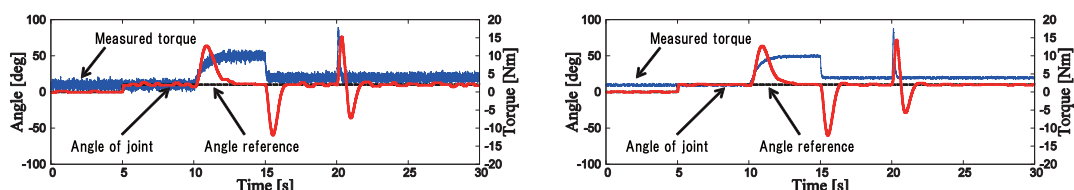


図7 目標値近傍での微振動除去，収束性向上を図ったシミュレーション結果，左：実験条件での応答，右：制御周期を4倍にし，トルク推定におけるヒステリシス等を補償した場合の応答

レーションを行ったところ，結果は変わらなかった。つまりタイミングベルト振動の影響は無視して良い。一方，制御周期を4倍にして外乱オブザーバのローパスフィルタカットオフ周波数をより大きくとること，およびヒステリシスやドリフト等の影響を補償しトルク推定精度を向上することの二点により，振動が抑制でき収束性が大きく向上することも分かった。現条件によるシミュレーション，および条件改善した際のシミュレーションの結果を図7に示す。

5. 結 論

回転型電磁モータと高減速比減速器の組み合わせにおいて，関節摩擦補償と，予測を用いた応答性向上により，柔軟かつ高精度な関節制御を実現した。フィードフォワード・フィードバック補償を併用することで，安価なトルクセンサであっても利用可能な方法を示した。また，サーボゲインを低くし柔らかさを生かしたまま，2自由度制御により目標値応答を向上した。収束性に問題が残るが，シミュレーションを用いて原因を特定し，対策を講じた。

[今後の研究の方向，課題]

短期的には，講じた対策を早急に実装する。トルク推定精度向上のためには，センサや起歪

体の動特性同定と補償が必要である。これを容易にするセンサ取付け部，歪検出部の形状設計等も課題として着手している。

開発した関節制御系を構成単位として様々な人親和ロボットを設計できる。本技術を利用した多軸型ロボットアームや脚ロボットの設計をすでに進めている。

[参考文献]

- [1] 大西公平，外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール，日本ロボット学会誌，Vol. 11, No. 4, pp. 486-493, 1993.
- [2] D. Tsetserukou et al., Optical Torque Sensors for Implementation of Local Impedance Control of the Arm of Humanoid Robot, In Proc. of 2006 IEEE Intl. Conf. on Robot. and Autom. 2006, pp. 1674-1679.
- [3] 杉原知道，目標値整形による簡単かつ安全な積分補償を導入したモータ制御日本ロボット学会誌，Vol. 27, No. 8, pp. 910-916, 2009.

[成果の発表，論文等]

- [1] 石川省吾，西尾政紀，杉原知道，フィードフォワード摩擦補償と外トルク計測を併用した安価なバックドライバブルモータ制御，第19回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp. 171-176, 2014.
- [2] 西尾政紀，杉原知道，光学センサの動特性補償による安価な関節トルク計測，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014（発表予定），1P2-J04, 2014.