位置フィードバック制御によるインピーダンス・衝突力制御の実験的考察

呉 世訓（東京大学大学院 工学系研究科），堀 洋一（東京大学大学院 新領域創成科学研究科）

Experimental Study on Impedance and Impact Force Control by Position Feedback Control

Sehoon Oh (Graduate School of Engineering, University of Tokyo)
Yoichi Hori (Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo)

Abstract

As assistance devices powered by electric motors have been increasing, motor control which is safe to human has become an important issue. This paper explores how the reaction force generated by a motor can be controlled by impedance control based only on position feedback. Q filter in Two-degree of freedom control is designed to make flexible impedance to external force maintaining tracking performance to the reference. Q filter with an unstable zero is also adapted to make assistance and reduce impact control. The proposal is verified by experiments.

キーワード：二自由度制御，インピーダンス制御，パワーアシスト，位相アシスト，不安定零点 Q フィルタ，衝突力制御
(Two Degree of Freedom Control, Impedance Control, Power Assist, Phase Assist, Q filter with an Unstabe Zero, Impact Control)

1. はじめに

近年，人間生活の身近なツールにモータを利用する例が増えている。それに伴い，動力源のモータをより安全に利用できるようにするため様々な工夫がなされている。本稿ではモータの外力に対するインピーダンス特性をエンコーダを利用した位置フィードバックだけによって制御することを提案，その性能の解析を行う。

特に従来高速高精度制御で用いられてきた二自由度制御を，外力を抑える方向でなく柔軟に対応するできるように Q フィルタの設計手法を見直す。より柔軟なインピーダンスを設計するにはその設計をどのように変更すればよいのか，その方針をゲインと位相の面から考え，モータを利用した実験をもって提案設計手法の有効性を実証する。

2. 二自由度制御系を利用した速度指令を力センサレスインピーダンス制御設計

外乱オブザーバを用いた二自由度制御は高速高精度制御の最も重要なアルゴリズムとして採用され続けてきた。指令値追従特性と外乱モデル誤差抑制特性がそれぞれ独立に設計でき，それぞれの設計指針が連続離散両方からよく研究されてきている。

図 1 に二自由度制御のブロック線図を示す。フィードバックとフィードフォワードのゲインの記述は後半の出力フィードバックゲインのインピーダンス制御への関係を考えてこのような記述とすることにする。外乱オブザーバを含んだループには外乱抑制とモデル化誤差に対するロバスト性の設計パラメータとして Q フィルタがあり，ローパスフィルタが採用されている。

〈2·1〉 外乱オブザーバを利用した力センサレスインピーダンス制御　図 2 に外乱オブザーバを力推定オブザーバとして用いたインピーダンス制御器のブロック線図を示した。特に力センサを用いないパワーアシスト制御器として

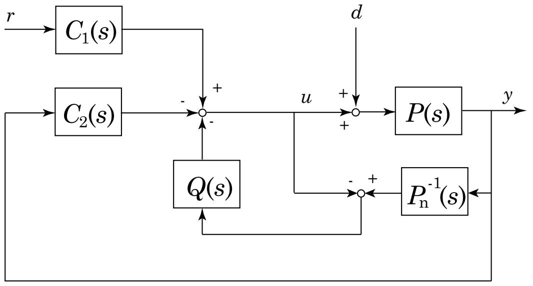


図 1　外乱オブザーバを含めた二自由度制御系
Fig. 1.　Basic Form of Two Degree-of-freedom Control with Disturbance Observer

用いられた構造で，モデルインピーダンスを実際のインピーダンスより軽くすることで外力に対するプラント特性を軽く見せかけパワーアシストを実現している。

各ブロックは，プラント P，外乱オブザーバ必要な逆モデル P_n^{-1} とローパスフィルタ Q_i，力オブザーバに必要な逆モデル P_n^{-1} とローパスフィルタ Q_o，モデルインピーダンス P_M，フィードバック制御器 A，として記述する。内側の外乱オブザーバで外乱を抑制，外側の外乱オブザーバはアシストしたい外力を推定し，実際のプラント (P) より軽く設計されたモデルインピーダンス (P_M) を通して生成されたアシスト速度指令値に追従するようなフィードバック制御になっている。

著者の今までの研究は図 2 の外部指令値 C を 0 とした，外力応答性設計をメインに考える力センサレスパワーアシスト制御を設計，分析してきた。しかし，図 2 のように設計し，$r \neq 0$ を入れることで従来の外部指令値を持つ二自由度制御とまったく同じフレームに乗せることができ，従来の解析や設計手法で力センサレスインピーダンス制御を

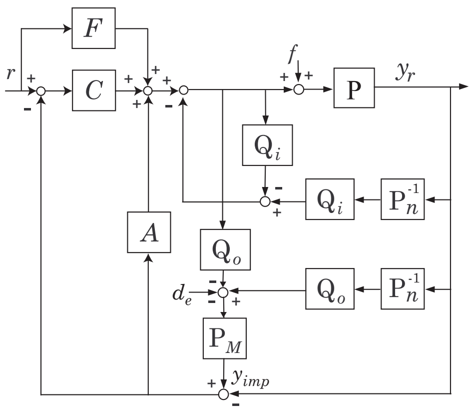


図 2　力センサレスインピーダンス制御の一般的な構造
Fig. 2.　Generalized Structure of Force-sensor-less Impedance Control

議論することができるようになる。

図 2 の出力フィードバックゲイン A は設計したモデルインピーダンス P_M への追従性を決めるゲインである。たと

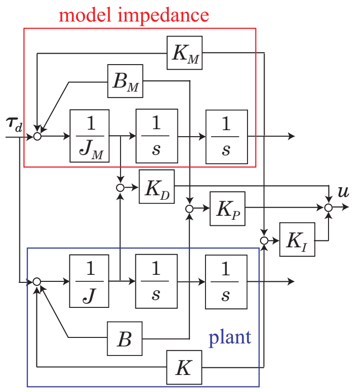


図 3　従来のインピーダンス制御のブロック線図
Fig. 3.　Impedance Control in Conventional Form

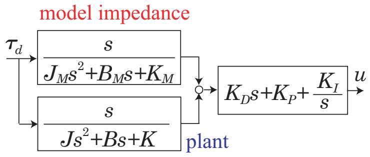


図 4　速度の PID 制御としてのインピーダンス制御
Fig. 4.　Impedance Controller in Velocity Control Form

えば，ゲイン A を図 4 のように PID 制御器とし，速度出力フィードバックを行うと従来のインピーダンス制御の図 3 と等価の制御ループになる。ここのインピーダンス制御器の PID ゲインが図 2 のゲイン A になる。

〈2·2〉　速度指令を持つ力センサレスインピーダンス制御系　　そこで，図 2 の二重外乱オブザーバ構造やモデルインピーダンス構造を従来の Q フィルタ構造に書き換えたのが図 5 である。従来のローパスフィルタであった Q の変わりにモデルインピーダンスやゲインが含まれている負のダイナミックス項が足されていることがわかる。

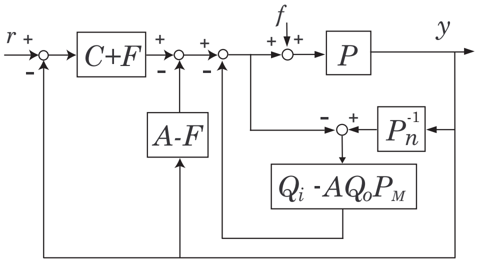


図 5　力センサレスインピーダンス制御の Q フィルタ
Fig. 5.　Q filter in Force Sensor-less Impedance Control

また，外部指令値 r を持つ力センサレスインピーダンス制御系のブロック図 5 は以下の定義によって図 1，図 2 と等価となる。

$$C_1(s) = C(s) + F(s) \cdots\cdots (1)$$

$$C_2(s) = C(s) + A(s) \cdots\cdots (2)$$

$$Q(s) = Q_i(s) - A(s)Q_o(s)P_M(s) \cdots\cdots (3)$$

そこで，外乱オブザーバを利用した力センサレスインピーダンス制御およびパワーアシスト制御器設計を図 1 の二自由度制御の Q フィルタ設計としてみることができる。力センサレスパワーアシスト制御器の，二自由度制御としての Q フィルタ周波数特徴を調べるために簡単な力センサレスパワーアシスト制御器を設計し，新しい Q フィルタ $Q_i - AQ_oP_M$ の周波数特性を調べた。$P_M = \frac{2}{s+1}$, $Q_i = Q_o = \frac{1}{0.01s+1}$ とし，ゲイン A を変化させたときの周波数特性を図 6 に示した。

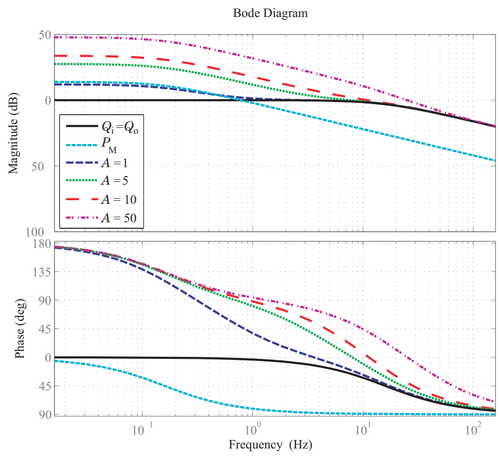


図 6　力センサレスインピーダンス制御の $Q_i - AQ_oP_M$ の周波数特性
Fig. 6.　Frequency Characteristics of $Q_i - AQ_oP_M$ in Force sensor-less Impedance Control

従来のQフィルタならローパスフィルタとして設計されるので，実線で示した $Q_i = Q_o$ の周波数特性を持つ。それが，この力センサレスインピーダンス制御ではモデルインピーダンスやそのゲインが足されて点線や破線で示された周波数特性を示すようになる。

Qフィルタの位相特性が特に興味深いところで，力センサレスインピーダンス制御の場合にはDC周波数で位相が180度から始まっている。この180度の位相こそが力センサレスパワーアシストを可能にする位相である。この特徴を利用した新しいパワーアシスト制御設計法を後ほど紹介する。そして，ゲイン A が大きくなるほど全体ゲインが高くなり，位相特性は $-P_M$ の位相特性に近くなっている。さらに高周波部はローパスフィルタ $Q_i = Q_o$ によってゲインが低減されている。この周波数特性から以下の二点がわかる。

（1） モデルインピーダンス P_M を実際の特性より重くするか軽くするかに関係なく力センサレスインピーダンス制御ではQフィルタに180度の位相が現れる。

（2） モデルインピーダンスによる高周波でのゲインの低減，および位相の遅れが存在することから力推定オブザーバの方ではローパスフィルタ Q_o を使わずにモデルインピーダンスをローパスフィルタ代わりに使用することができる。

〈2・3〉 力センサレスパワーアシスト制御のロバスト性議論　最後に一点注意しておくべきことは，力センサレスインピーダンス制御設計でパワーアシストを行うときのロバスト安定性問題である。このロバスト安定性問題をフィードバック制御のゲイン位相余裕問題としてみるため図7のように外乱オブザーバの部分をまとめてひとつの出力フィードバックとして表した。ただし，$Q_i - AQ_oP_M$ の力センサレスインピーダンス制御のQフィルタは $Q = Q_i - AQ_oP_M$ として記述している。

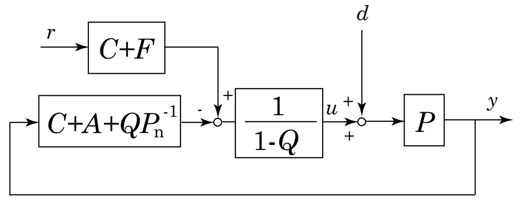


図7　出力フィードバックをまとめた二自由度制御系

Fig. 7.　Simple Output Feedback Form of Two-degree-of-freedom Control

著者らは(1)でこの構造のオープンループ特性を分析，P_M を P_n より軽く設計した場合に全体的に正帰還になること，そして P_M と P_n のDC成分の差分だけのゲイン余裕をゲイン A で調整するのが力センサレスパワーアシストのロバスト安定性調整であること示している。

図7のブロック中の $C + A + QP_n^{-1}$ がこの正帰還と負帰還を決定している。たとえば，$P_n = \frac{1}{J_n s}$, $P_M = \frac{1}{J_M s}$ とおいた場合，このブロックは

$$C + A + Q_o(1 - \frac{A}{J_M s})J_n s = C + A(1 - Q_o\frac{J_n}{J_M}) + Q_o J_n s \quad (4)$$

となり，($J_M < J_n$) の場合には第二項が負の値になる。A が大きくなるほどこの負の項は大きくなり，全体としてより大きい正帰還構造をつくることとなる。高いゲインはインピーダンス追従特性は向上するがロバスト安定性を弱くするトレードオフになっている。

最後にこの分析から，Qフィルタにフラットなゲイン特性を持つ180度位相が存在しても必ず全体が正帰還になるわけではなく，P_M と P_n のダイナミックス，またゲイン A との関係で負帰還になるということがわかる。

3. 二自由度制御による速度・インピーダンス・衝突力制御設計

本稿では従来の力センサレスインピーダンスコントロールの設計を図2として設計しないで，二自由度制御の一般的な構造，図1として分析設計する。また，インピーダンス制御の中，剛性，粘性が大きいプラントを軽く見せかけるインピーダンス制御，パワーアシストに繋がるインピーダンス制御をメインに設計する。

〈3・1〉 二自由度制御による力センサレスインピーダンス制御設計　二自由度制御系による力センサレスインピーダンス制御器にある三つの制御ゲインを明確に表示したブロック線図を図8に示した。速度指令値へのゲイン，速度出力のフィードバックゲイン，そしてインピーダンス 制御のためのモデルインピーダンスにかかるゲインである。速度指令値とモデルインピーダンスへの追従特性を上げるためには

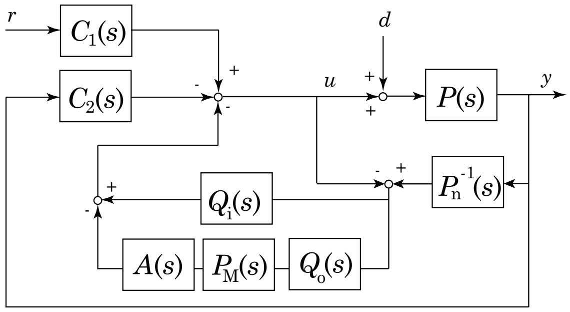


図8　力センサレスインピーダンス制御の3つのゲイン

Fig. 8.　3 Gains in Force Sensor-less Impedance Control

$$C_1 = C_2 = A \quad (5)$$

とし，A を高く設計すればよい。また，この二つの追従特性をそれぞれ独立に設計したい場合にはこれらのゲイン C_1, C_2, A を別々に設計しなければならないが，出力フィードバックゲイン C_2 が共通になることで完全に独立に設計するには外部指令 r のフィードフォワード設計などの工夫

が必要となる。同じ速度レベルの指令値追従特性とモデルインピーダンス指令値追従特性を，このフィードフォワード設計を利用して独立設計する方法に関して著者たちの別の論文 [2] で提案しており，本稿では以下の二点の考察を行う。

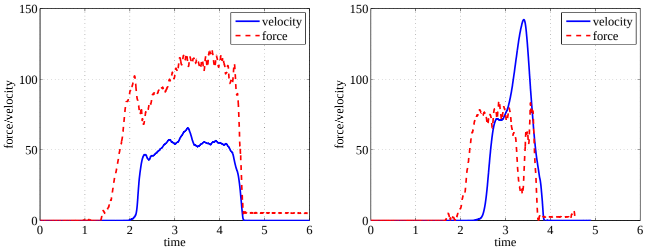
（1） インピーダンス制御による応答性制御

（2） 外部制御を位置制御にしたときのセンサレスインピーダンス制御

インピーダンス設計による位相アシスト制御　インピーダンス制御またはパワーアシスト制御で必要となる性能のひとつは応答性を速めることである。

$$\frac{1}{J_M s + B_M} = \frac{K_M}{\tau_M s + 1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

式 (6) のようにモデルインピーダンスが設計されているとき K_M を大きくすることもアシストに繋がるが τ_M を小さくすることもアシストとなる。著者らは τ_M を小さくするこの制御を位相アシストと呼んでいて，ゲインのアシストよりロバスト性が問題になることを示している [1]。ここでは応答性を速くしたときの力センサレスインピーダンス制御の特徴を実験を持って分析する。



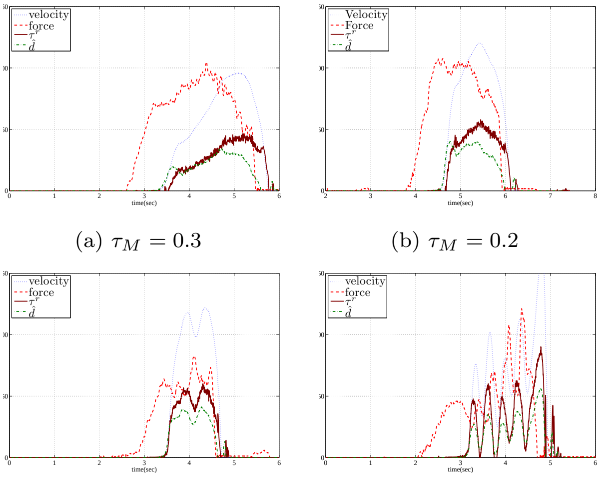
アシストなし (w/o assist)　　アシストあり (w/ assist)

図 9　インピーダンス制御による基本的アシスト特性

Fig. 9.　Assistance Performance by Impedance Control

図 9 に基本アシスト特性をあらわす実験結果を示す。実験装置は摩擦の大きいボールねじ（リード 5mm）を利用し，外力が可動子に線形方向に働く仕組みとなっている。破線は力センサで測った人が入れた力，実線はそのときの速度である。モータのトルク指令値の次元にスケーリングして推定したプラントの特性は $J_n = 0.0012, B_n = 0.015$ であったが，それを $J_M = 0.0007, B_M = 0.0043$ とするインピーダンス制御を行った結果である。インピーダンス制御がない場合には 50mm/sec の速度を出すために人間が 10N(グラフでは 0.1 倍して表示) の力を出す必要があったが，インピーダンス制御下では 7.5N 程度の力で 150mm/sec に近い速度が得られている。提案インピーダンス制御が力アシストをしていることが確認できる。

図 10 には設計時定数 τ_M を 0.3 から 0.05 まで変えながら実験を行った結果の応答特性を示す。破線は人の力，点線は速度，実線はモータが出しているトルク，鎖線は推定された外力である。



(a) $\tau_M = 0.3$　(b) $\tau_M = 0.2$

(c) $\tau_M = 0.1$　(d) $\tau_M = 0.05$

図 10　インピーダンス設計による応答特性制御

Fig. 10.　Response Control by Impedance Design

摩擦が大きく，実際の力が働いてから可動子が動くまでの応答時間が長いので外力推定値 $\hat{d}$ は実際の力よりだいぶ遅れ可動子が動いてから立ち上がっている。τ_M の大小によってインピーダンス制御のためのトルク (τ^r) の立ち上がりが変わってくることがわかる。τ_M が 0.3 から 0.05 まで小さくなってくると応答性を速くするためのアシストトルクも速く立ち上がる。また応答性が速くなるほど人間が入れている力のピークが小さくなる傾向がある。これは対象物が速くアシストされ動いてくれることを人間が感じて，力をそれ以上入れないようになることを意味する。しかし τ_M が小さ過ぎる場合にはアシストトルクの立下りも速く，人間はアシストが少なくなったと思ってさらに力を加え続けるようになる。図 10(d) の振動は，応答性の速いアシストトルクのオン・オフに対する人間の加えている力の振動特性によるのである。また，その応答性改善の限界は外力推定の速さまでに制限されることもわかる。

位置追従制御下でのインピーダンス制御　提案する力センサレスインピーダンス制御は二自由度制御である以上，外部指令値追従特性と外力応答特性を独立に設計できる。外力応答特性は式 (6) のように所望の機械インピーダンス特性設計で設計，それへ追従するよう設計できる。また外部指令値に対する追従特性設計も独立に設計できる。この独立性に注目，外部は定位置にとどまるようにする位置制御（具体的には図 2 のフィードバック制御 C だけに I 制御を行う），外力応答特性は図 10 の (c) のようなインピーダンス制御を行った実験結果を図 11 に示した。

図 10 と同じ計測量に図 5 の外部フィードバック量 (図中のブロック $C + F$ の直後の信号) を太い実線として追加した。2 秒前に入れた力に対してモータはアシストトルク τ^r を出力するがそれにより対象物の位置が最初の定位置から

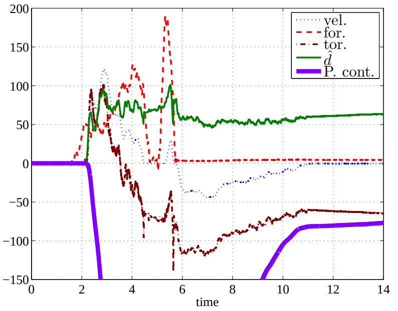


図 11　位置制御下でのインピーダンス制御
Fig. 11.　Impedance Control with Position Control

離れることにより外部位置制御によるモータトルク指令値（図では P.cont.）が大きく発生する。これによりモータが出すトルク τ^r は最初のアシストのための力から位置制御のためのフィードバック力になる。そしてこの位置制御トルクのために 4 秒少し過ぎに速度が 0 と減速してしまう。また，人間が 5 秒付近で大きな力を入れるがすでにモータはバネとして作用しているため，速度はほとんど出ない。そして 6 秒近くで人間が手を離すと対象物は位置制御により元に戻るため負の速度を持ち最初の定位置に戻ろうとする。ただし，6 秒以降の推定外力 $\hat{d}$ はすべて摩擦力である。

ということで，この二自由度制御の設計により定位置付近では力インピーダンス制御の作用で人間の外力で自由に動かせるが，その位置から離れるほど対象物は硬くなり元の位置に戻ろうとする制御が設計できた。この特徴から人間が手を離したら元の位置に戻る必要のあるパワーアシストドアなどに応用できると考えられる。

二自由度制御での柔軟な外力応答のためのインピーダンス制御と外部指令追従制御は，その方向によって相反する力を必要とすることがある。しかし，提案設計法及びその実験結果からこの二つの制御を周波数を適切に分離して設計することによって，実用的でかつ安定な設計が可能であることがわかる。

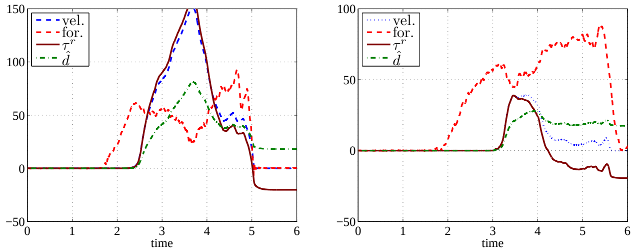
〈3•2〉 位相に注目した力センサレスパワーアシスト制御

不安定零点を利用したアシスト制御　図 6 で力センサレスインピーダンス制御では外乱オブザーバの Q フィルタにフラットなゲイン特性に 180 度の位相特性を持つ周波数が現れることを確認した。この位相特徴に注目し本稿では特定の周波数領域にフラットなゲイン特性と 180 度近くの位相特性を持たせるため，式 (7) のような不安定零点を持つフィルタを Q フィルタとして提案する。（ただし，$Q_i(s)$ は従来のローパスフィルタ）

$$Q_{\text{assist}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} Q_i(s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

従来の力センサレスインピーダンス制御で図 5 のような $Q_i - AP_M Q_o$ を Q フィルタとして採用している。しかし前節で調べたようアシストのためなら速い応答性が望まれ，それが外力の推定速度によって制限されるのであれば特定周波数以上の推定外力をそのまま定数倍してモータトルクとして出した方が最もよいアシスト特性となる。

式 (7) の Q フィルタを利用した二自由度制御では，周波数 $1/\tau_u$ (rad/s) 以上の外力は $\frac{\tau_u}{\tau_l}$ 倍されたモータアシストをもらうようになる。分子の (-) 項により高周波では 180 度の位相特性を持つからである。また $1/\tau_l$ (rad/s) の周波数では従来の外乱オブザーバとおりの働きをし，その周波数成分の外力は抑制されるようになる。



(a) $\tau_u = 12, \tau_l = 5$　(b) $\tau_u = 2.4, \tau_l = 1$

図 12　不安定零点 Q フィルタによるアシスト特性
Fig. 12.　Assist Control by Q Filter with an Unstable Zero

図 12 に 2 種類の設計パラメータ $\tau_u = 12, \tau_l = 5$ と $\tau_u = 2.4, \tau_l = 1$ 下での実験結果を示した。より低い周波数 ($\frac{1}{12}$rad/s) からアシストを始める (a) の結果では 2.5 秒あたりから十分なアシストが働き，高速で対象物が動いている。また注目すべきなのは人間の力がない 5 秒以降の推定外力，すなわち摩擦力に対してモータは負のトルク，摩擦を打ち消す方向のトルクを出していることである。

これに比べその 5 倍の周波数 $\frac{1}{2.4}$rad/s からアシストを始める (b) では人間の操作力の周波数成分が低く 3 秒過ぎから現れるアシスト力が低い。しかも，人間が変化の少ないトルクを出し続けている 4 秒以降，モータのトルクは正のアシスト力から負の抑制力に変わっていることがわかる。すなわち適切なアシストのためには τ_u, τ_l を人間の操作力の周波数特性に合わせて設計する必要がある。

以上のことから，不安定零点をもつ Q フィルタによって安定なアシストができ，さらにその周波数特性を決めるパラメータを適切に設計することでアシスト特性を調整することができることがわかった。

位置追従制御下での不安定零点 Q フィルタアシスト制御　二自由度制御の枠組みで提案不安定零点 Q フィルタを設計することを考え，外部の指令値追従制御に位置制御を設計した時の外力応答特性を確認した。図 13 にその結果を示す。図 11 と同じ計測量に太い破線の提案 Q フィルタを通した外力応答トルクを加えた。実際モータが出すトルクは太い実線の位置追従のためのトルクと太い破線の Q フィルタを通した外力応答トルクの和になる。

図 13 の太い破線のモータのトルクを見てみると不安定零点を持っていることから高周波成分の外力はアシストし，低周波成分の外力は抑制するフィルタになっている。最初の 5 秒まで，人間が操作力を加えはじめている段階は Q フィルタはこの力をアシストするトルクを生成している。しかし，人間が手を離した後，一定の摩擦だけが外力として働いてくると徐々に Q フィルタの出力はアシストの正のトルクから抑制の負のトルクに変わってくる。そして，8.5 秒以降は摩擦を打ち消すトルクとして働き，外部の位置追従制御の精度を高めることになる。

太い実線の外部位置制御のトルクはかなり高めのゲイン設定になっていても 6 秒から 8 秒の間，元の位置に戻すには足りないトルクになっているが，Q フィルタの役割によって 8 秒から 10 秒の間，15 秒から 18 秒の間摩擦に打ち勝って元の位置に戻っていることがわかる。以上のことから，不安定零点を Q フィルタに用いることで外力を効率よくアシストしながら本来の指令値追従制御も実現することができる二自由度制御が設計できることが実証された。

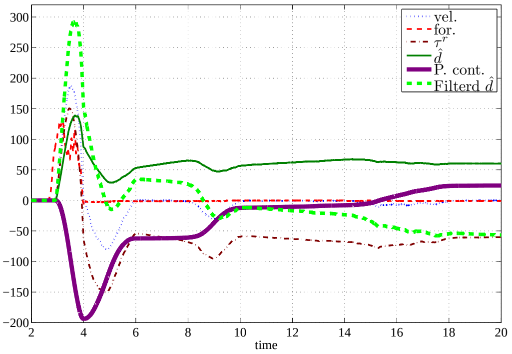


図 13　位置追従制御下での不安定零点 Q フィルタアシスト制御

Fig. 13.　Position Control w/ Assist Control by Unstable Zero Q filter

〈3・3〉 Q フィルタ設計による衝突力緩和制御　最後に不安定零点 Q フィルタを利用して衝突緩和制御を行う。昔から衝突緩和制御には衝突力の微分値を利用することが必要とされている。そこで，本稿では衝突力を外乱オブザーバで推定，その微分値を不安定零点 Q フィルタを通してフィードバックすることで安定に衝突力を緩和することを提案する。

式 (7) の変わりに式 (8) の Q フィルタを衝突力緩和のために採用する。

$$Q_{\mathrm{IC}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} Q_i(s) D(s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

ただし $D(s)$ はローパスフィルタを含んだ擬似微分である。この Q_{IC} を Q フィルタとして利用したときの衝突力制御実験結果を図 14 に示す。一定の比率でトルクを増加させエンコーダで衝突を感知したらこのトルクを 0 にし，衝突緩和用のフィードバックトルクだけをいれる実験を行った。わずかであるが衝突力が緩和されていることがわかる。衝突力の緩和は短い時間での早いトルク変化が必要となるため，速度や外力推定のローパスフィルタに加え，内部電流制御の速い応答特性も必要となる。外部指令値追従制御器までを含めた衝突力緩和制御の詳しくは著者らの [(2)] を参考されたい。

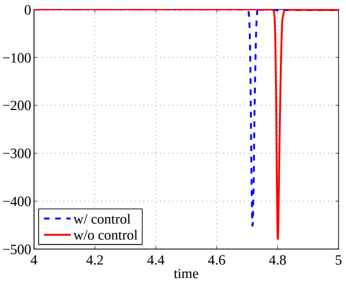


図 14　不安定零点 Q フィルタによる衝突力緩和制御

Fig. 14.　Impact Control by Unstable Zero Q filter

4. 結　論

本稿では従来の高速高精度制御のために用いられてきた二自由度制御を今後応用が期待される人間親和型モーションコントロールのため再設計した。従来提案されてきた力センサレスパワーアシスト制御もしくはインピーダンス制御が二自由度制御の範疇に属することを，ブロック線図の変形を利用して示し，そのインピーダンス制御のための Q フィルタ設計を提案した。

モデルインピーダンスに追従する制御では，別の論文で示している外部指令追従特性と内部モデルインピーダンス追従特性がそれぞれ別のゲインによって独立に設計できる特徴以外に，外部指令を位置指令に内部モデルインピーダンスを速度型にした設計を提案，その有効性や実用性を実験を持って示した。

また最後に Q フィルタのゲイン特性だけでなく位相特性にも注目,180 度の位相特性が外力アシストに繋がることを利用して不安定零点を用いたパワーアシスト制御を提案した。実験を通して速い周波数の人間の力はアシストしながら低い周波数の摩擦は抑制する働きをすることが確認できた。また安定かつ速い外力アシストが衝突力緩和制御にも有効であり，今後の研究が必要であることを示した。

参考文献

（1） S. Oh, Y. Hori, “Generalized Discussion on Design of Force-sensor-less Power Assist Control”, in *Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 492-497, 2008.

（2） 小林邦生, 呉世訓, 稲玉繁樹, 堀洋一「環境剛性の推定と２自由度制御にもとづく電車ドアの知的制御」, **電気学会産業計測制御研究会**, IIC-09-116, 2009.