

Abstract

Tools that support human activities are emerging as spotlighted products. Control methods for those supporting tools should be different from those for industrial tools.

This paper suggests a novel control method that will satisfy the necessary conditions for the control of supporting tools. Sensor fusion and flexible disturbance attenuation control are two necessary conditions we suggest.

When designing an observer for the sensor fusion, the late sampling time of a sensor is often raised as the problem. We introduce a prediction method that produces the estimation of output error. The effectness of this method is evaluated in a simulation

The other suggestion is the flexible disturbance attenuation that designs the response to external disturbance. The disturbance response will be adjusted by the parameters : inertia, damping and stiffness. Fractional order integral is supposed to be a factor that will make the disturbance response flexible.

Keywords : instantaneous speed observer, sensor fusion, flexible disturbance attenuation, two-degree-of-freedom control, impedance control, inertia control, fractional order impedance control, power-assisted wheelchair, gravity compensation

1 序論

1.1 福祉応用ツールにおける問題

近年福祉への工学的サポートが注目を浴びている。マスメディアでも介護ロボットや医用工学などをとり上げるようになってきており、工学の人間生活サポートへの新しい一歩と思われるようになってきた。その中での制御工学が担うべきところは大きいといえる。機械やモータなどを人間と接触させながら利用するにはまだ様々な問題がある。特に大きな出力が必要な場合は安全性の考慮と人間に違和感や危機感を与えてはいけないというような問題が生じる。

これらの福祉用ツール開発における問題をまとめてみると以下のようなものがあげられる。

環境への適応性 人間の動作半径は広範囲に至る特徴を考慮し、様々な環境で使えるものでなければならない。そのため、制御器が様々な動作環境を感知する必要がある。

優れた操作性 福祉用ツールは人間に接して使われることが多く、その動作の小さな動きまで人間が感じ取ってしまう。従い、人間にぎこちなく感じされないような操



図 1: Various Power Supporting Tools

作性が必要となる。

外乱への柔軟性 産業用モータ利用では指令値には完全に追従し外乱は完全に除去できることを目標で2自由度制御が利用されてきた。しかし、人間の身近で利用されるツールの制御では安全性や操作性のために外乱を柔軟性を持って抑圧しなければならない。

評価の難しさ どのような制御がよい制御なのか、そのパフォーマンスの評価が難しい。

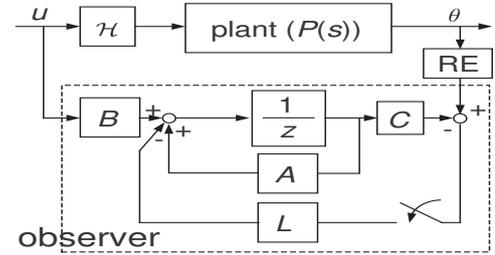
これらの問題に対する答えを出していくのが本研究の目的であり、それを「人間親和型制御」と呼ぶことにする。そのソリューションとして「センサー統合」と「やわらかい外乱抑圧制御」をキーワードとした制御を提案する。センサー統合により動作環境や物理量を正確に測り、上記で述べた環境への適応性や優れた操作性を向上することができ、やわらかい外乱抑圧制御を実現することで優れた操作性を保ちつつ外乱を柔軟に抑圧することができるのである。

本輪講ではまず、新しい瞬時速度オブザーバの設計法を提案し、そこからセンサー統合の基本となる観測周期が異なる複数のセンサーが存在するときのオブザーバの設計法を提案する。そして、後半ではやわらかい外乱制御の実現方法に関して従来から一般的に使われてきた手法とそれらに基づいた新しい制御器設計法を紹介する。また、物理的な次元もやわらかい制御と関係あることから非整数次積分を利用したやわらかい外乱抑圧制御も提案する。最後にこの二つの考えに基づいた新しいパワーアシスト車椅子の制御をとり上げる。

1.2 パワーアシスト車椅子における問題

坂などの傾斜を持つところでの車椅子走行は大きな力を必要とする。しかし、現在市販中のパワーアシスト車椅子には坂での重力補償は行っていないものがほとんどである(たとえば、YAMAHA JWII)。これはまさに先ほど述べたモータから大きな出力を出すときの制御が難しさによることである。本研究で提案するセンサー統合とやわらかい外乱抑圧制御を利用して車椅子の傾斜でのパワーアシスト制御を実現する。

車椅子は低速運転と停止を繰り返す乗り物であり、その速度制御を行うためには瞬時速度オブザーバが必要となる。従来のオブザーバは低速での推定速度低下の問題があったので、より低速でもよい状態推定ができるように瞬時速度オブザーバを改良する。これはセンサー統合のひとつの例といえる。また、重力を外乱としてとらえ、その影響をやわらかく抑圧する制御器を設計して、実験によるその検証を行った。



2 遅い観測周期を持つセンサーを利用したオブザーバの一設計

序論にも話したように福祉応用ツール開発にはエンコーダ、ビジュアルセンサー、力センサーなど複数センサーを利用する必要性が出てくる。そのような複数センサーを利用し、オブザーバを設計すると様々な物理量を推定し、制御を行うことが可能になる。オブザーバを設計することはセンサー統合のもっとも基本的で手法である。しかし、複数センサーを利用したオブザーバ設計において以下のような問題が考えられる。

- 制御周期が遅いセンサーによって全体の推定特性が左右されてしまう。
- 複数センサーを利用したオブザーバはマルチ入力を持つことになり、ゲインの決め方に考慮が必要である。

本研究ではこの中の制御周期が遅いセンサーを利用したオブザーバ設計における問題に注目して制御手法を提案することにする。観測周期が遅いセンサーに関して新しい観測情報が入って来ない間は他のセンサーやプラントの数学モデルを利用し、遅いセンサーが測定すべき値を作ることが提案手法の基本的な考え方である。

2.1 状態誤差予測を利用したオブザーバの設計

まずは実際のプラントが式 (1) だとし、式 (2) のような状態オブザーバを設計する。

$$x[n+1] = Ax[n] + Bu[n], \quad y[n] = Cx[n] \quad (1)$$

$$\hat{x}[n+1] = A\hat{x}[n] + Bu[n] + L(y[n] - C\hat{x}[n]) \quad (2)$$

式 (2) で見られるオブザーバの構造は、 $A\hat{x}[n] + Bu[n]$ のモデルによるシミュレーションと $L(y[n] - C\hat{x}[n])$ の誤差修正フィードバックの和になっている。センサーが遅いときの問題はフィードバック項を設計しているサンプリング周期で入れることができないことである。

参考文献 [1],[2] では瞬時速度オブザーバにおけるこのような問題に関して議論している。ロータリエンコーダから得られる情報はパルスで与えられる量子化されたホイールの回転角度である。モータの速度をこのエンコーダ情報を単に微分するのではなく、オブザーバを設計して推定する手法をとっているのが瞬時速度オブザーバである。しかし、回転速度が遅くまたエンコーダの解像度も低い場合には実際は回転していても分解能を超えない限り回転角度を得ることができない。すなわち、回転速度が遅くなると、エンコーダによる回転角検出周期も遅くなるのである。これが瞬時速度オブザーバにおける観測周期が遅くなる現象である。

図 2: the Structure of the Instantaneous Speed Observer

[1],[2] ではフィードバック項をセンサー情報があるときにだけ加え、センサー情報がないときにはモデルによるシミュレーションだけを行うオブザーバを設計している。これを図示したのが図 2 である。新しいパルスが来ない間は回転体のダイナミックスのシミュレーションから速度を推定し (図 2 のスイッチがオフになる)、新しいパルスがきたらオブザーバの推定値との誤差をとりフィードバックさせ誤差を収束させるのが瞬時速度オブザーバの仕組みである (図 2 のスイッチがオンになる)。

しかし、新しいセンサー情報がないときもフィードバック項を入れた推定を行うオブザーバを設計することができる。まず、オブザーバによる状態推定誤差のダイナミックスを以下の式であらわす。

$$e[n+1] = (A - LC)e[n] + d[n+1] \quad (3)$$

$d[n+1]$ は $t = nT$ と $t = (n+1)T$ の間に新たに発生した外乱やモデル化誤差を意味する。 $t = (n+1)T$ でセンサーが新しい観測値を出すことができないとき、この $d[n+1]$ の情報は得られない。しかし、 $t = nT$ での状態誤差の動きを表す $(A - LC)e[n]$ に関しては予測を行うことができる。そこで、 $t = (n+1)T$ から $t = (n+k)T$ までの状態誤差を以下のように予測しオブザーバに利用することにする。

$$\begin{aligned} \tilde{e}[n+1] &= (A - LC)e[n] \\ &\vdots \\ \tilde{e}[n+k] &= (A - LC)^k e[n] \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち、 $t = (n+k)T$ での状態オブザーバを式 (4) のように設計するのである。

$$\hat{x}[n+k+1] = A\hat{x}[n+k] + Bu[n+k] + LC\tilde{e}[n+k] \quad (5)$$

ここで注目すべき点は、センサーの観測によって得られる値は $e[n]$ でなく $y[n] - Cx[n] = Ce[n]$ になっていることである。 $Ce[n+k]$ を $e[n]$ からでなく $Ce[n]$ からできる予測式が必要である。そのため C と以下のような関係を持つ行列 E を導入する。

$$CE = E^T C^T = I_m \quad (6)$$

ただし、ここで m は出力 y の次数である。 A の大きさ、すなわち e の次元を r とおくと一般的に $r \geq m$ が成立する。 E を選ぶことは r 次元の中で C を構成している m 個の線形独立なベクトルを直交化する線形変換行列を求めることであり、

必ず存在する。また、

$$C(A - LC)^k = T(k)C \quad (7)$$

となる $T(k)$ が存在するという仮定を置く。これは $CA = MC$ を満たす M が存在するという仮定と等価であり、強い仮定であって成り立たないシステム (A) が多い。しかし、ここでは式 (7) が成り立つと仮定して以下の議論をやっていく。E を利用すると $T(k)$ を以下のように求めることができる。

$$C\tilde{e}[n+k] = C(A - LC)^k e[n] = T(k)Ce[n] \quad (8)$$

$$T(k)C = C(A - LC)^k \quad (9)$$

$$T(k)CE = C(A - LC)^k E \quad (10)$$

$$T(k) = C(A - LC)^k E \quad (11)$$

を得ることができ、遷移行列 $T(k)$ を利用することで $Ce[n]$ から新しいセンサー情報が得られないときの出力値誤差 $C\tilde{e}[n+k]$ を計算することができた。さらに、 $A - LC$ の極が安定であることからこの線形予測の安定性は保証されることがわかる。また、センサーがいくつ存在していても C のランク (ここでは m) だけの大きさを持つ I_m を作れる行列 E は必ず存在するので、この考え方は複数センサーを利用したオブザーバ設計におけるサンプル周波数統合に対応できる。

提案するオブザーバと文献 [1],[2] の新しいセンサー情報が来たときだけフィードバックをしたオブザーバの収束速度を比較する。従来の図 2 のオブザーバは新しいセンサーが入ってきたときだけフィードバックをかけるスイッチが入っている。これに比べ、提案するオブザーバは以下の図 3 の構造を持っている。スイッチを入れないでラッチを利用して保持した値を常にフィードバックを行うが、そのゲインが可変になっている。

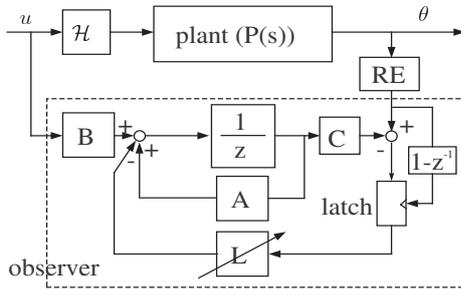


図 3: Proposed Gain-Variable Observer

このような構造の違いによる推定結果の違いを考える。図 4 に両手法における推定誤差の変化を抽象的に描いた。 T_2 はオブザーバの設計周期で T_1 はセンサーから新しい情報が来る周期である。 T_1 の周期が一定なのか可変なのかは利用するセンサーによって異なってくる。

両周期の間に $T_1 = KT_2$ の関係があるとして、最初のセンサー情報獲得 ($t = nT_2$) から k サンプル後 ($t = (n+K)T_2, k \leq K$) の両オブザーバにおける状態誤差 ($e = x - \hat{x}$) の変化は以下の式で表される。フィードバックにより遷移行列が違って

いることがわかる。

$$e[n+k] = A^{k-1}(A - LC)e[n] \quad (12)$$

$$e[n+k] = (A - LC)^k e[n] \quad (13)$$

一般的にプラント自体の遷移行列 A の固有値より $A - LC$ の固有値が小さくなるように L が設計されるので、センサー信号があるときだけフィードバック行う式 (12) に比べ提案手法の式 (13) の収束特性が速い特性を持つ。

また、提案手法のゲインオブザーバゲイン L の決定は T_2 周期に基づいて行えばよく、文献 [2] では議論している T_1 の可変性に起因するオブザーバの不安定性は問題にならない。

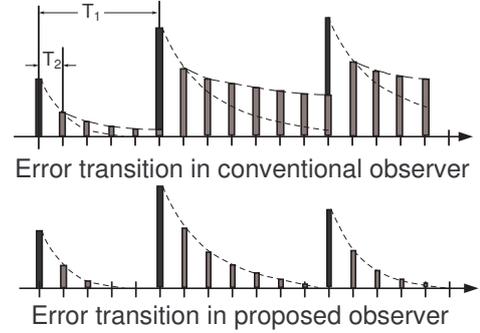


図 4: Convergence Characteristics in Two Methods

2.2 速い収束特性を持つ瞬時速度オブザーバの設計

前節で説明したオブザーバの設計手法を利用して瞬時速度オブザーバを設計した。

瞬時速度オブザーバの構造は以下の式 (14) で表される。

$$\begin{aligned} \hat{x}[n+1] &= A_d \hat{x}[n] + B_d u[n] + L_d (y[n] - \hat{y}[n]) \\ \hat{y}[n] &= C_d \hat{x}[n] + D_d u[n] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\hat{x}[n] = \begin{pmatrix} \hat{\omega}_d[n] \\ \hat{\theta}_d[n] \\ \hat{d}[n] \end{pmatrix}, A_d = \exp \begin{pmatrix} -\frac{B}{J}T & 0 & \frac{T}{J} \\ T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_d = \begin{pmatrix} \frac{T}{J} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C_d = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで、 ω_d は角速度を、 θ_d は回転角、 d は外乱、そして T はサンプリング時間、 L_d はオブザーバゲインである。また A_d, B_d, C_d はそれぞれ図 2 の A, B, C に対応し、 D_d はここでは 0 とする。

このプラントに対してオブザーバを設計し、シミュレーションした結果を示す。従来の手法との比較を図 5 に示した。

提案手法は低速時に、また速度推定より外乱推定において著しく現れる。両方の時定数を同一に設定しているが、提案手法の方の推定速度が速いことが確認できる。

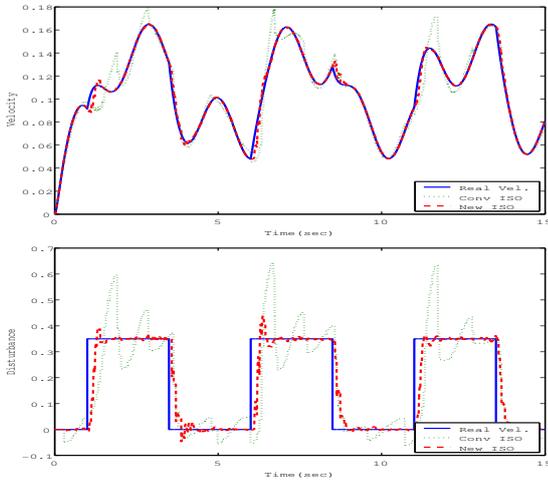


図 5: Estimation Simulation Results (Upper: Speed, Below: Disturbance)

3 人間親和型制御に向けて - やわらかい外乱抑制制御設計

工学技術が進むにつれて、様々なモータが人間の活動領域の近くで利用される例がますます増えている。その規模も従来の電車などの大規模なものから最近のペットロボットまで様々である。しかし、人間が担うべき負荷をモータでアシストするケースで見られるような、ある程度以上の出力をもつモータを人間の身近で利用する場合にはその危険性に注意しなければならない。最近起きた自動回転扉による死亡事故が代表的な例だといえる。

ここで見られるように人間の身近な環境におけるモータを利用したアシストにはひとつの問題点がある。それは「外部の負荷となる力をモータの出力でアシストして除去すべきではあるが、その力が人間に害を及ぼすようなものになってはいけない」ということである。

この要求に対する答えとして本研究では「やわらかい外乱抑制制御」の実現方法に関して考慮することにする。

3.1 やわらかい外乱抑制制御器の構造の提案とその特徴

自由な外乱応答設計ができるように図 6 の構造を持つ外乱抑制制御器を設計する。

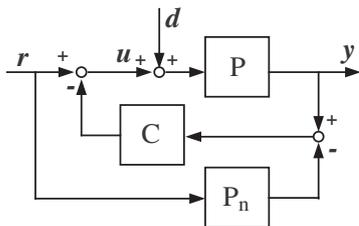


図 6: Proposed Flexible Disturbance Attenuation Control

図 6 で見られるように指令値 (もしくは規範出力 $P_n r$) と

実際の出力 y とのずれに基づき外乱抑圧制御を行う構造である。

この制御器による応答は式 (16) のようになる。

$$y = P \left(\frac{1 + CP_n}{1 + CP} r + \frac{1}{1 + CP} d \right) \quad (16)$$

この構造は受動型適応制御 [3] と呼ばれる制御手法の構造と一緒であるが、 C の設計をまったく違う形にしており、外乱の抑圧特性も違う。参考文献 [3] の受動型適応制御では C を βP^{-1} とプラントの逆モデルとして設計している。

$$T_{yd} = \frac{1}{\beta + 1} P \quad (17)$$

その結果、式 (17) のように外乱の周波数特性にかかわらず $\frac{1}{1+\beta}$ のゲインで抑圧することになって、速くて硬い制御になってしまう。しかし、この研究では以下で述べるように外乱に対するプラントの慣性や粘性または stiffness のような物理的特性を自由に変える設計を行うので、受動型適応制御と構造は同じであっても制御の目的とそれによる制御器設計はまったく違うものになっている。

また、外乱特性を自由に設計する制御器に外乱オブザーバを利用した 2 自由度制御 [8] がある。付録の A で詳しく述べているが、この外乱オブザーバも強い外乱抑圧を目的として図 6 のような自由な外乱応答設計には適していない。

図 6 を利用した様々なやわらかい外乱応答設計を紹介する。

3.2 外乱応答の物理次元を考慮したやわらかい外乱抑圧制御インピーダンス制御を利用した設計例

提案する 6 の構造をもつ制御器は外乱応答設計が自由にできることをすでに述べた。ここではその C を具体的にどのように設計するかに関する方針を述べる。6 はロボットの力制御で利用されてきたインピーダンス制御と類似点を持っているので、まずインピーダンス制御を簡単に説明する。

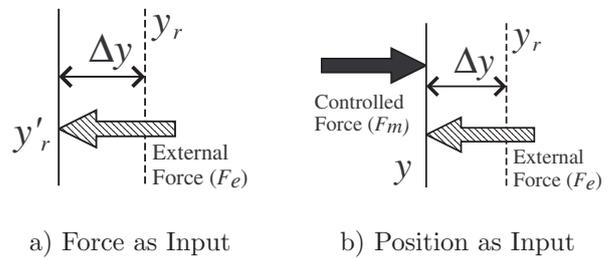


図 7: the Concepts of Impedance Control

「外力に対してやわらかさをもって反応する」という概念はロボット制御ではインピーダンス制御 [4],[5] と呼ばれ 1960 年代から研究されてきた。その基本概念を図 7 に示した。外力 F_e を計測し、それに基づいてどれほどの Δy を作り出すかを計算し、外力を考慮しなかったときの位置の指令値 y_r にそれを加え新しい指令値 $y'_r = y_r + \Delta y$ を作る手法である。 F_e と Δy との関係は式 (18) のように決めて y'_r に反映すること

で式 (19) のような F_e と Δy の関係を実現することができる。

$$\Delta y = -\frac{1}{M_d s^2 + B_d s + K_d} F_e \quad (18)$$

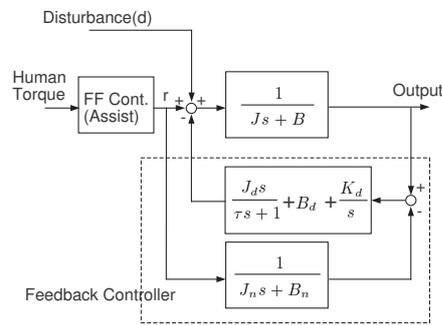
$$\begin{aligned} M_d (\ddot{y} - \ddot{y}_r) + B_d (\dot{y} - \dot{y}_r) + K_d (y - y_r) \\ = M_d \Delta \ddot{y} + B_d \Delta \dot{y} + K_d \Delta y = -F_e \end{aligned} \quad (19)$$

図 6 の構造は 7 b) の図のように構造化して見ることができ、インピーダンス制御と関連させることができる。 y_r は $P_n r$ で記述できるノミナル出力、もしくは出力指令値でありそれと実際の出力の差 $y - P_n r$ が図 7 における Δy に当てはまる。この Δy に基づいてどれほどの出力を出すかを決定するのが C である。

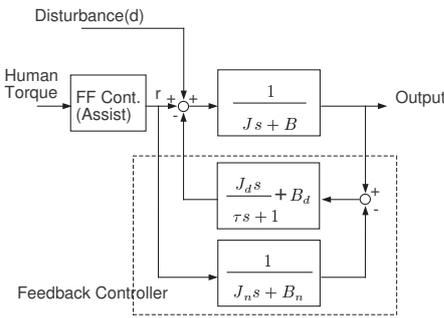
すなわち、 Δy と $\frac{P}{1+CP} \Delta y$ の関係をにもつ F_m を作ることで F_e に対応するのである。 $\frac{P}{1+CP}$ を適当に設計することでさまざまな外乱応答特性を設計することができる。後ほど述べる位置型外乱抑圧制御にし

$$\frac{P}{1+CP} = \frac{1}{M_d s^2 + B_d s + s} \quad (20)$$

になるように C を設計するとインピーダンス制御ができるのである。



a) force to position



b) force to velocity

図 8: Two Impedance Models

しかし、外乱応答のやわらかさやプラントの特性を考えたときにインピーダンスの次元を考える必要が出てくる。4 節で述べる車椅子の重力補助制御には外力と位置との関係 (stiffness) を 0 にしなければならない。stiffness を 0 にすると一種の速度制御になる。このように位置もしくは速度など外力と関係する物理次元を考慮したやわらかい外乱制御を考えることができる。図 8 の a) が stiffness を 0 にした慣性・粘性制御であり、b) はそれに位置との関係 (ここでは stiffness が K_d) を入れたインピーダンス制御になっている。

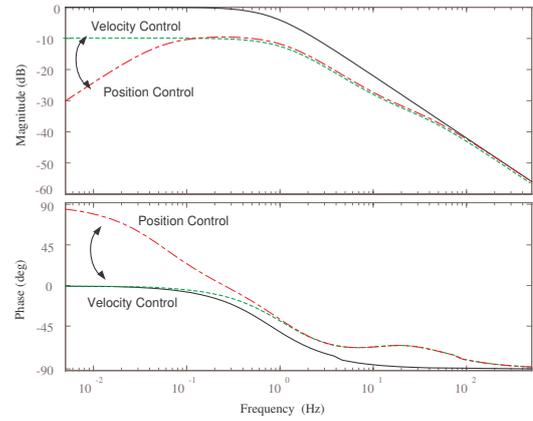


図 9: Physical Dimensional Difference in Bode Diagram

インピーダンス制御における stiffness K_d はやわらかい外乱制御において重要なファクタである。それをより詳しく調べるため図 9 に外力 d からプラントの速度までの Bode 線図を示した。外乱応答モデルに stiffness が入ると DC ゲインが減っている。この stiffness により以下のような特徴が出てくる。

- ステップのような定常外乱の影響を強く除去できる。
- 速度型制御とは違い、外乱がなくなると元の位置に戻ろうとする。
- ワインドアップ現象が起きる。

すなわち、stiffness が入ることで低周波外乱もしくは定常外乱の抑圧特性がよくなるのであるが、ワインドアップ現象などその抑圧の強さによって逆に危険なことが起こりうることをわかる。

非整数次積分を利用したやわらかい制御

stiffness を入れると外力による位置の変化に対してもモータが力を出すことになり、より外乱に対して「硬く」反応することになる。外乱に対して速度制御型制御をするか位置制御型制御にするかという物理的次元の問題も外乱抑圧の「やわらかさ」に関係しているのである。そこで、最近注目を浴びている非整数次制御 [6] を利用することで新しい「やわらかさ」を取り入れることができる。図 10 にその概念を示す。

Bode 線図から低周波外力に対する反応を設計するとき非整数次制御は有効であることがわかる。位置制御が必要な制御対象でのやわらかい外乱抑圧には stiffness だけでなく、速度と位置の間の「次元」の制御をやわらかくする制御パラメータとして利用可能なのである。また、非整数次制御を利用すると純粋積分が入らないことによりワインドアップ現象にも強いことが予想される。今後実験で確かめていく予定である。

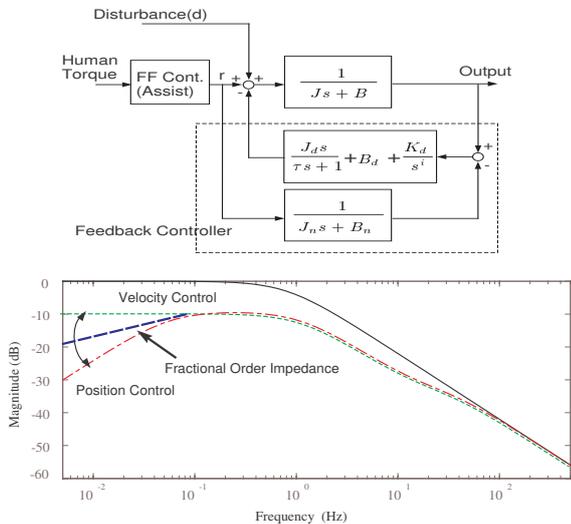


図 10: Fractional Order Impedance Models

4 外乱情報を利用した車椅子の重力補償制御

4.1 重力補償制御の必要性

序論でも述べたように車椅子の重力補償制御は必要かつ重要であるがそれほど簡単には実現されない。

傾斜環境で車椅子をこぐとき人が感じる負担は、平地を走るときの負担と比べ格段と大きい。図 11 に平地と傾斜での人が出すトルクと車椅子の進行程度を示した。同じ程度を進むため人間が出すべき力、またその力積は、平地と傾斜で何倍かの差がある。すなわち、車椅子は傾斜でこそパワーアシストが必要なわけである。

平地でのパワーアシスト車椅子は人間が出したトルクに比例するトルクをモータから出して走行をアシストすればよいが、傾斜でのパワーアシストはそう簡単にはできない。まずは、傾斜では車椅子の重心が不安定になりやすいのでむやみに大きな力を出して補助してはいけない。これに関しては [7] で前輪浮上角オブザーバを利用して解決を試みている。

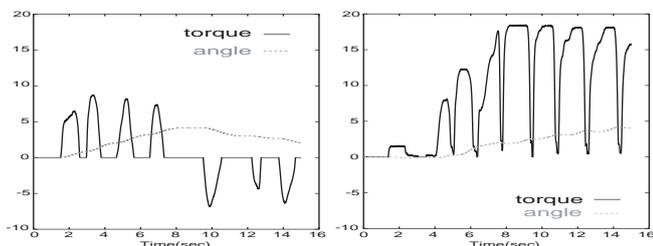


図 11: Necessary Forces in Level Ground and Declined Ground

傾斜でのパワーアシストは重心移動による不安定化以外に、重力による影響を測定してその分までモータでアシストしなければならない。重力の影響を測るためには何かセンサーが必要で、またその情報を制御に利用するため加工しなければならない。

ここでは前節で述べたやわらかい外乱抑圧制御を車椅子

に適用することで重力の影響をやわらかくなくすアシスト制御手法を提案し、その実験結果を示す。

4.2 出力端外乱補償型慣性制御による重力補償

車椅子が坂の上にいるときの重力の影響は外乱としてみることができる。その外乱情報をフィードバックさせることで重力の影響をなくすることができる。そこで、図 12 のようなコントローラの中に内部モデルを作り、その出力と実際の出力の誤差をフィードバックさせることでやわらかい重力補償を行う。

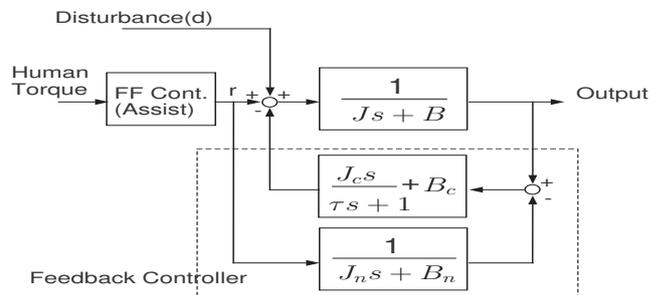


図 12: Gravity Compensation Control using Flexible Disturbance Attenuation Control

重力に対して車椅子の剛性やダンピングを大きく見せかける [4] ことによって外乱に対しては簡単に動かない動かないようにするのである。そのため、図 6 での Q として $\frac{J_c s}{\tau_c s + 1} + B_c$ を C として採用した。その結果、式 (25) のようであった車椅子のダイナミクスが外乱に対しては式 (21) のような動きにくい属性になったのである。

$$\frac{1}{(J + J_c)s + (B + B_c)} \quad (21)$$

乗り物である車椅子の重力補償は位置の次元よりは速度の次元で行うべきである。そこで、モデルと実際の車椅子の速度や加速度の誤差に適切なゲインをかけてフィードバックさせて慣性制御を行い、外乱だけに対して慣性や摩擦の特性を変えることで重力補償を実現する。車椅子の回転角情報はエンコーダ (950ppr) を通して得ることができる。速度や加速度を得るためにはエンコーダが低精度であるので、ここでは 2.2 節で提案した瞬時速度オブザーバを利用し車椅子の速度を推定してフィードバックを行った。

この結果アシスト性能を悪化させずに重力を補償する制御器を設計することができた。実験結果を以下に示す。

これらの制御はすべて車椅子の速度に基づいて行われている。この速度の情報は前節で説明した瞬時速度オブザーバを使っている。

左の図は平地を上るときの人間が出したトルクとモータが出したトルク (フィードバック部分だけ)、また車椅子の進み具合を示している。右の図は傾斜走行時のそれである。人間のトルクがないときのモータトルクの出力を見ると提案する制御手法により重力 (外乱) を補償する出力が出ていることがわかる。

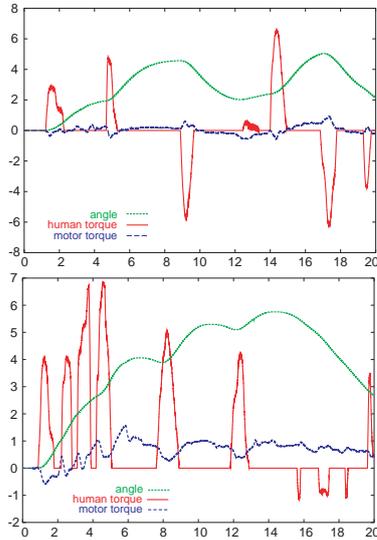


図 13: Experimental Results(Upper : Level Ground, Below : Declined Ground))

5 結論

本研究では福祉応用製品には欠かせない人間親和型制御手法の提案を行った。人間親和型制御の重要な要素であるセンサーの統合とやさしい外乱抑制制御に対し従来の試みを紹介し、その改善方法を提案した。

センサー統合に関しては観測周期が異なるときのオブザーバ設計問題に対し状態誤差をモデルベースに予測していくことでオブザーバの推定特性を改善することができることを示した。その例として瞬時速度オブザーバを設計し、シミュレーション結果により推定において優れた性能を持つことが確認された。

やさしい外乱抑制制御に関しては従来の外乱オブザーバより外乱応答を自由に設計できる制御手法を提案した。そして、外力応答モデルの物理次元も応答のやさしさと関係があることに着目して速度型、位置型、非整数次型外乱抑制制御をそれぞれ提案した。

最後にそれらを利用して車椅子の重力補償制御を行った。瞬時速度オブザーバから得られた速度情報を利用して重力を補償する制御器を設計し、その補償特性を実験によって確かめた。

5.1 今後の課題

高度な物理量観測のためのセンサー統合では複数のセンサーを利用することになり、オブザーバの入力が多入力になる。この多入力に伴うゲインの決め方にはさまざまな議論の余地がある。特にそれぞれのセンサーが観測する物理次元が異なる、加速度などの高次の物理量が観測できるなどの特徴を取り入れることでよりロバストでよい推定値を出すゲインの決め方を見つけることが可能になるはずである。

また、さまざまな物理状態値を観測しそれに対してやさしい制御を行うことが可能である。たとえば、車椅子の場合は前輪浮上角(ピッチ)や左右回転角(ヨー)の制御が必要な

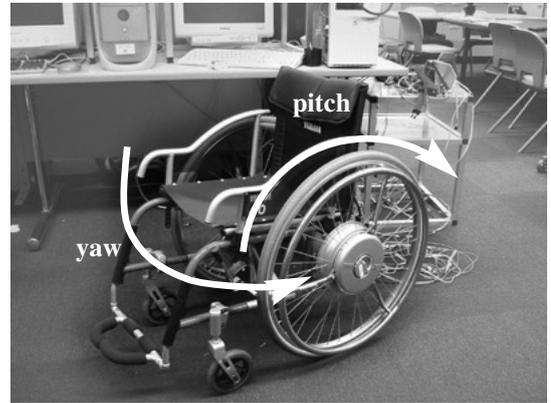


図 14: Various Controllable Angles in the Wheelchair Drive

ので、その制御における外乱抑制制御を提案手法で設計することが可能である。特にこのピッチ角とヨー角の制御は重力補助制御とは違い位置制御型の外乱抑制が必要であるので、非整数次インピーダンスを利用するやさしい制御のよい実験対象になる。これら以外にも提案した人間親和型制御手法は福祉応用ツールの各種物理量制御への応用期待できる。

A 外乱オブザーバ [8] によるやさしい外乱抑制

産業用モータ制御などでは効果的な外乱の除去のために外乱オブザーバが用いられてきた。その特徴として 1) 外部外乱やパラメータ誤差などの外乱情報を観測することができること 2) 観測した外乱をフィードバックさせることで外乱やパラメータ変動にロバストな制御ができることがあげられる。ロバストであることは抽象的にいうと外乱やモデル誤差に対してとても硬い、そなわちそれらの完全な除去を目標としていることを意味する。この外乱オブザーバの設計パラメータとしては Q フィルタがあり、この Q フィルタによって外乱応答が決定される。

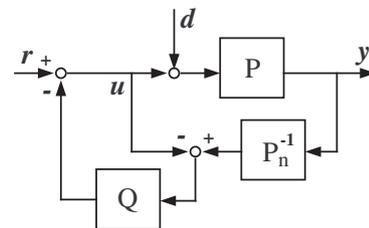


図 15: The Structure of the Disturbance Observer

図 15 の外乱オブザーバによる出力は以下の式 (22) のようになる。

$$y = \frac{P}{1 + Q(P_n^{-1}P - 1)}r + \frac{P(1 - Q)}{1 + Q(P_n^{-1}P - 1)}d \quad (22)$$

$P_n = P$ であれば外乱 d が完全に観測できて $(1 - Q)$ をもって外乱抑制を制御することができる。また、 $Q = 1$ になると外乱は完全に消えて r から出力までの入力応答が $y = P_n r$

となり、入力応答も制御することができる。すなわち、 Q を 1 に近づけるととても外乱に対して硬い制御ができるのである。やわらかい制御を行うためには Q を 1 以下にすることである。これを目的に式 (23) のような Q フィルタを設計したときの外乱応答を式 (24) に示す。ただし、 $P_n = P$ と仮定している。

$$Q(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{1 - \Delta K}{\tau s + 1} \quad (23)$$

$$y = Pr + \frac{\tau s + \Delta K}{\tau s + 1} Pd \quad (24)$$

この外乱オブザーバをプラントが式 (25) をプラントモデルにして設計し、フィードバック制御を行ったときの力から速度までのボード線図が図 16 である。 $K(\Delta K)$ によって低周波における外乱の除去の度合いが決められ、 τ によってはその外乱除去の周波数帯域が決まることがわかる。

$$\frac{1}{Js + 1} \quad (25)$$

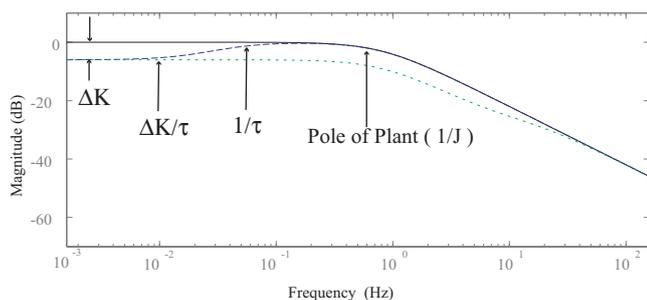


図 16: Disturbance Response by the Disturbance Observer

しかし、この Q フィルタは式 (22) で見られるようにブレイクフィルタの役割をしていてプラント P の極は変えられない特性がある。たとえば、図 16 において $\frac{1}{J}$ の周波数大域は変えられない。また、 Q フィルタの DC ゲインを 1 にすると外乱応答の DC ゲインが下がり、stiffness を入れた位置制御になる特徴を持っている。ゲインの調整によって位置型と速度型制御の切り替えができる特徴は興味深い特徴ではあるが、やはり位置型制御においても設計自由度はそれほどない。

参考文献

- [1] Yoichi Hori : "Robust and Adaptive Control of a Servomotor Using Low Precision Shaft Encoder", *IEEE IECON'93*, 1993.
- [2] L. Kovudhikulrungsri, T. Koseki : "Improvement of Speed Estimation of an Induction Motor with a Low-Resolution Sensor for Pure Electric Braking System" *ICEE 2001*, pp. 43-47.
- [3] 玉置 研二, 大西 潔, 大西 公平, 宮地 邦夫, 「受動的適応制御を用いた DC サーボモータの 2 自由度制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.11, pp.1175 1182, 1986.
- [4] H.Kazerooni, T.B.Sherindan, P.K. Houpt: "Robust Compliant Motion for Manipulators, PART I,II", *IEEE*

Journal of Robotics and Automation, Vol.2, No.2, pp.83-105, 1986.

- [5] 小管 一弘, 「力制御型の分類と制御システムの設計法」, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.751 758, 1991.
- [6] Chengbin Ma, Yoichi Hori : "Backlash Vibration Suppression Control of Torsional System by Novel Fractional Order PID^k Controller", *IEEJ Trans. IA*, Vol.124, No. 3, 2004.
- [7] Naoki Hata, Yoichi Hori: "Backward Tumbling Control for Power Assisted Wheel-chair based on Phase Plane Analysis", *Medicine and Biology*, 2003.9, Mexico
- [8] Takaji Umeno, Yoichi Hori: "Robust Speed Control of DC Servomotors using Modern Two-Degrees-of-Freedom Controller Design", *IEEE Trans. on IE*, Vol.38, No.5, pp.363-368, 1991

発表文献

1. 呉 世訓, 堀 洋一, 軸ねじれ振動抑制を考えた TCSC 制御器設計, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会, No.359, 1999.8 長崎
2. 呉 世訓, 堀 洋一, 軸ねじれ振動抑制を考えた TCSC 制御器設計, 総合試験所年報, Vol.58, pp.253-258, 2000.1
3. 呉 世訓, 堀 洋一, TCSC の非線形性を考慮した SSR 振動抑制制御器の設計, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-00-21, 2000.3.10
4. Sehoon Oh and Yoichi Hori, TCSC Controller Design Considering Torsional Vibration Suppression in Turbine-Generator System, Proc. of IPEC-2000, Vol.3, pp.1357-1362, 2000.4
5. 呉 世訓, 堀 洋一, 軸ねじれ振動抑制を考えた TCSC 制御器設計, 電気学会産業応用部門誌, Vol.120-D, No.8/9, pp.980-986, 2000.8
6. Nobutaka Bando, Sehoon Oh and Yoichi Hori: " External disturbance rejection control based on identification of transfer characteristics from the acceleration sensor for access control of hard disk drive system ", Proc. of AMC 2002, pp.52-56, 2002.7.3-5, Maribor
7. 坂東信尚, 呉 世訓, 堀 洋一, 加速度センサからの伝達特性に基づいた外部外乱抑圧制御器の磁気ディスク装置への応用, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-88, 2002.8
8. Nobutaka Bando, Sehoon Oh and Yoichi Hori: "Acceleration Feedforward Control based on Adaptive Identification of Transfer Characteristics for Hard Disk Drives ", IIP/ISPS Joint MIPE'03, pp. 28-29, 2003.
9. Nobutaka Bando, Sehoon Oh and Yoichi Hori: "Disturbance Rejection Control based on Adaptive Identification of Transfer Characteristics from Acceleration Sensor for Hard Disk Drives System", 電気学会論文誌 D 部門, Vol. 123, No. 12, 2003.
10. Sehoon Oh and Yoichi Hori: "A Novel Control Method for Power-assisted Wheel Chair ", Proc. of 6th SNU-UOT Joint Seminar on Electrical Engineering, 2003.11, Seoul
11. 渡邊 信哉, 島 直輝, 呉 世訓, 堀 洋一, 傾斜環境を考慮したパワーアシスト車椅子制御の高機能化, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-04-29, 2004.3.11
12. Sehoon Oh and Yoichi Hori: "Development of a Gravity Compensation Controller for Power-assisted Wheelchairs Using a Novel Instantaneous Speed Observer " IPENC 2004 (発表予定)
13. Sehoon Oh, Naoki Hata, and Yoichi Hori: " Development of Various Observers for Intelligent Power Assist Control of a Wheelchair ", SICE Annual Conference 2004 (発表予定)