

アシストタイプ電動ユニットの片流れ制御技術 One-sided flow prevention technology for assist type electric units

水野 正光

Abstract

Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter, "the Company") began selling electric units for wheelchairs in 1995. In 1996, the "JW-II" - the predecessor model of the assist-type electric unit "JWX-2" currently on sale - was placed on the market. The assist-type electric unit (hereafter, "the electric unit") is an application of the power-assist technology used in electric-assisted bicycles, applied to wheelchairs in this case. The electric unit detects the magnitude of the force applied to the hand-rims used to operate the wheelchair and outputs a corresponding driving force from the motor as required. In addition, by attaching the electric unit to a manual wheelchair, it can be easily transformed into an assist-type electric wheelchair. However, in the same way as a manual wheelchair, when an assist-type electric wheelchair must be used on a one-sided slope (a slope that is inclined in either direction with respect to the direction of travel), there is a phenomenon called one-sided flow, in which the course of the unit turns along the slope. When a unidirectional phenomenon occurs, the user needs to strongly operate the hand rim on the lower side in order to correct the course. Reduction of this phenomenon has been a long-standing issue.

This paper introduces the one-sided flow prevention mechanism jointly developed with the Hori Laboratory of the University of Tokyo^{*1}, which has a proven track record in this research, in order to help overcome the above problems.

1 はじめに

ヤマハ発動機株式会社(以下当社)では、1995年から車椅子用電動ユニットの販売を始め、1996年には現在販売中のアシストタイプ電動ユニット「JWX-2」の前身モデルである「JW-II」の販売を開始している。

アシストタイプ電動ユニット(以下本電動ユニット)は、電動アシスト自転車に使われているパワーアシスト技術を車椅子に応用したものである。本電動ユニットは、車椅子の操作に使うハンドリムに加えられた力の大きさを検出してそれに応じた駆動力をモーターで出力できる。また、本電動ユニットを手動車椅子に装着することで簡単にアシストタイプ電動車椅子(図1)に変身させることができる。

ところで、アシストタイプ電動車椅子には手動車椅子と同じようにやむを得ず片斜面(進行方向に対してどちらかに傾斜した斜面)を進まざるを得ない場合、斜面に沿って進路が曲がってしまう片流れという現象が発生する。片流れ現象が発生すると使用者は進路を補正するために谷側のハンドリムを強く漕ぐ必要があり、疲労のみならず左右不均衡な体の使い方による二次障害を発生させる要因となることから、片流れ現象の低減は永年の課題であった。

本稿では、前記課題を克服するために当該研究で実績のある^[1] 東京大学堀研究室^{*1}と共同開発した片流れ制御について紹介する。



図1 アシストタイプ電動車椅子例

2 アシストタイプ電動ユニットのセンサー

本電動ユニットには、左右のホイールの中央に位置するハブの中に、ハンドリムに入力されたトルクを計測するトルクセンサー、モーターの電気角および回転数を計測するエンコーダー、モーターに流れる電流値を計測する電流センサーなどを備えている。

3 片流れ抑制の基本構想

車椅子が直進時にどちらかに曲がるのは、車椅子のヨー方向になんらかの外力(片斜面では主に重力が働く)によるモーメントが働くことが原因である。このモーメントの大きさを推定して、そのモーメントを打ち消す方向にモーメントを与えてやることであれば、ヨー方向に働くモーメント(図2)をゼロとすることができ、結果として車椅子を直進させることができるというのが片流れ抑制の基本的な考え方である。

なお、打ち消しモーメントは、モーターの出力トルクを調整してやることで発生させることができる。



図2 ヨー方向に働くモーメント

4 打ち消しモーメントの推定

4-1. ヨー方向の回転運動の運動方程式

車椅子が片斜面を直進する時のヨー方向の運動方程式は、次のように記述できる。

$$J \cdot d\omega/dt = Tg + Th + Tm - Ta + Tf \quad ①$$

Tg : 重力に起因するモーメント

Th : 使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分

Tm : モーターが出力するモーメントのヨー方向成分

Ta : ヨー方向の空気抵抗に起因するモーメント

Tf : ヨー方向の摩擦に起因するモーメント

J : 車椅子のヨー方向の慣性モーメント

ω : 車椅子のヨー方向の角速度

4-2. ヨー方向の運動方程式の近似

一般的に、①の運動方程式を解くのは容易ではないが、車椅子の使用条件を考慮することで簡略化できる。①の式をいかに簡略化したかについて概要を述べる。

4-2-1. Ta の近似

アシストタイプ電動車椅子は時速6km/h程度の低速度で使用され、また車椅子が走行する片斜面は3°程度の斜面を想定している。そのため、片斜面を曲がっていく時のヨー方向の角速度は極めて遅く、空気抵抗自体をゼロと考えても差し支えない。このことから、ヨー方向の空気抵抗に起因するモーメント Ta をゼロとする。

4-2-2. Th の近似

使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分であるが、前述したように本電動ユニットではハンドリムに入力されたトルクを計測できるトルクセンサーを備えているため、原理的には計測された値から計算をすることができる。しかしながら、本電動ユニットで備えているトルクセンサーは、力の弱い使用者の入力トルクを計測できるようにダイナミックレンジが設定されている。その影響により比較的力量を出せる方や走行中のブレーキング(ハンドリムを握れない力の弱い方でも専用グローブをはめてハンドリムに手をあてると、グローブとハンドリムの摩擦を利用した比較的に強い減速操作が可能)時には、簡単にトルクセンサーのダイナミックレンジを超えてしまう。このような状態の時には正しい計測ができないことからハンドリムに入力されたトルクからヨー方向成分の計算をすることをあきらめ、使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分も含めて外力によるモーメントとして扱うようにする。なお、重力に起因するモーメントと使用者がハンドリムに入力したモーメントのヨー方向成分を合算したモーメントを新しく外力によるモーメント Td と定義する。

4-2-3. Tf の近似

ヨー方向の摩擦に起因するモーメントはこれらのモーメントの中で最も近似が難しいが、次のように考える。

静止摩擦が働いている状態は、実際にはモーメントが働いてはいるが、車椅子の動きとしては片流れ現象が発生しているわけではない(片流れしないように踏ん張っている状態)。そのため、静止摩擦が働いている状態の Tf を便宜的にゼロとみなすことにする。

次に動摩擦が働いている状態であるが、回転運動方向とは反対の方向に摩擦に起因するモーメントが働くため、次のように Tf を記述できる。

$$Tf = -A \cdot \omega/|\omega| \quad \text{ただし、}\omega \neq 0 \quad ②$$

前述したように車椅子のヨー方向の角速度は極めて遅く、値が取り得る範囲も極めて狭い範囲である。このことから $|\omega|$ を

一定値として扱い、以下のように近似する。

$$T_f = -B \cdot \omega \quad (3)$$

なお、この近似式は ω をゼロにすることで静止摩擦が働いている場合の近似も表現ができる。よって、ヨー方向の摩擦に起因するモーメント T_f を③式で近似する。

4-2-4. ヨー方向の運動方程式の近似式

4-2-1から4-2-3の結果からヨー方向の運動方程式①を近似した式を用いると外力によるモーメント T_d は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} J \cdot d\omega/dt &= T_d + T_m - B \cdot \omega \\ T_d &= J \cdot d\omega/dt - T_m + B \cdot \omega \quad (4) \end{aligned}$$

4-3. 打ち消しモーメントの算出

4-3-1. 角速度 ω および $d\omega/dt$ の計測

前述したように ω は車椅子のヨー方向の角速度である。右車輪および左車輪にはそれぞれにモーターが接続されるため、エンコーダーから計測されるモーター回転数とタイヤ径などからそれぞれの車輪速度を算出することができる。さらに、右車輪速度と左車輪速度の差と右車輪と左車輪のトレッド幅から車椅子のヨー方向の角速度を算出することができる。また、 $d\omega/dt$ は ω の微分値なので、 ω の時間変化から求めることができる。

4-3-2. 車椅子のヨー方向の慣性モーメント J の算出

車椅子のヨー方向の慣性モーメントは、車椅子や使用者の形状(姿)や質量が決まると計算可能であるが、一意に定まるわけではない。とはいえ、アシストタイプ電動車椅子の場合には、使用者がハンドリムを漕いで操作することを前提にしているため、前輪(キャスト)上げのために重心と車軸との距離が離れているということもなく、全体的な形状は円筒と考えても差し支えない。

以上のことから本開発では、代表的な車椅子の諸元を代表値に J を算出する。

4-3-3. 係数 B の算出

係数 B は、摩擦に関連する係数であり、摩擦係数や車椅子や使用者の形状や質量、斜面の傾斜角度等から求めることができる。一般的にこれらの数値も一意には定まらないが、片流れが発生する状況が屋外の舗装路が多いことや代表的な車椅子の諸元を代表値とすることで係数 B を算出する。

4-3-4. T_m の計測

前述したように右車輪および左車輪にはそれぞれにモーターが接続されるため、電流センサーで計測されるモーター電流とタイヤ径などからそれぞれの車輪モーメントを算出することができる。さらに右車輪モーメントと左車輪モーメントの差と右車輪と左車輪のトレッド幅から、モーターが出力するモーメントのヨー方向成分が算出できる。

4-3-5. J および B の補正

当社の車椅子用電動ユニットシリーズは、使用者個々の残存能力に応じて電動車椅子の加減速度などを調整できるように「JW スマートチューン」というアプリケーションをセラピストや販売店向けに提供している。

前述したように車椅子のヨー方向の慣性モーメント J や係数 B は、代表的な車椅子の諸元を元に算出を行っているが、 J や B の算出要素である質量については使用者の個人差が大きく、結果として実際の値と算出結果との間に乖離を発生させる要因となっている。その乖離を少なくするように「JW スマートチューン」で使用者の質量(体重)を入力できるようにし、補正をかけられるようにした。

4-3-6. T_d の計算

4-3-1から4-3-5の結果から外力によるモーメント T_d を計算することができる。

4-3-7. 打ち消しモーメントの算出

打ち消しモーメントは、 T_d と同じ大きさで T_d と向きが反対方向のモーメントになる。

なお、本電動ユニットで打ち消しモーメントを発生させるためには、打ち消しモーメントを右車輪モーメントと左車輪モーメントに分割し、さらに各車輪モーメントを各車輪に接続されたモーターの電流値に換算する必要がある。これらは、4-3-4の計算手順とは反対の計算を行うことで算出することができる。

4-4. 旋回運動時のゲイン抑制

ここまで説明してきた片流れ抑制は、直進時に斜面に沿って進路が曲がっていく片流れ現象を抑制することを考えているため、基本的には $|\omega|$ が大きくならないように制御することを前提にしている。そのため意図的に旋回運動をしているような場合には片流れ制御が働かないようにする必要がある。

上記要求を満たすために本制御では、車椅子の直進方向の速度によりゲイン G を算出し、4-3-7で算出した打ち消しモーメントにゲイン G を乗算することで車椅子が旋回運動をしている

場合には片流れ制御が効かないようにした。

なお、ゲイン G の算出に車椅子の直進方向の速度を利用しているのは、車椅子の運動として直進方向の速度が高くなると旋回成分が小さくなることや、車椅子の使い方として直進方向の速度が低い領域では片流れ制御への要求が相対的に低いことが理由である。

図3に車椅子の直進方向の速度とゲイン G の関係を示す。

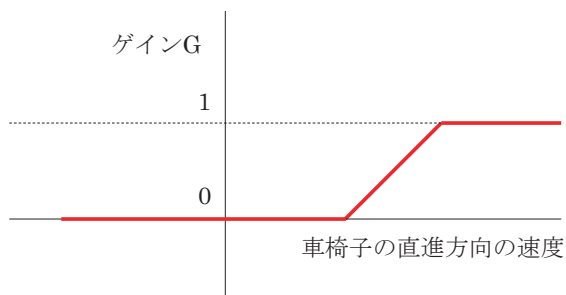


図3 車椅子の直進方向の速度とゲイン G との関係

■ 著者



水野 正光
Masamitsu Mizuno
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
JW ビジネス部

5 おわりに

アシストタイプ電動ユニットに導入した片流れ制御について概要を説明した。本制御によりアシストタイプ電動ユニットが備えるセンサー情報を利用して車椅子の片流れ現象の抑制が図れることを示した。

なお、今回の紹介記事では効果の程度についての説明は省いている。当社ホームページの電動車椅子の製品紹介^[2]に本制御の効果を示す動画が掲載されているため興味がある方はぜひ見ていただきたい。

■ 謝辞

本制御の開発に協力をいただいた国立大学法人東京大学 堀 洋一先生、金 佳英氏をはじめとする関係者の皆様^{*1}に感謝申し上げます。

*1 開発当時

■ 参考文献

- [1] 金 佳英, 南 康鉉, 呉 世訓, 藤本 博志, 堀 洋一: パワーアシスト車椅子における人間親和型ヨー運動制御, 平成22年電気学会産業応用部門大会, VOL. 2, pp. II-603-II-606, 2011
- [2] ヤマハ発動機 ホームページ「JW スウィング電動車椅子」
<https://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/lineup/swing/>
(アクセス日 2022/7/11)