車いすと mPm 連結時の操舵力低減を目的とした駆動輪制御システムの開発

電気・化学専攻　医用工学領域　2281295　渡邊　直人
(主査：和多田　雅哉 教授　副査：桐生　昭吾 教授，桃沢　愛 准教授)

1. 緒言

近年、我が国が抱える社会問題の一つに老老介護が挙げられる。老老介護は介護者の負担が大きい。特に、高齢者は肢体不自由者の割合が高く、歩行が困難な人が多い。そのため、車いす利用者が多く、その介護者は車いす介助を強いられる。老老介護における車いす介助はとりわけ身体的な負担が大きい。老老介護は身体的な負担が精神的な負担となり、介護うつや認認介護を引き起こす可能性がある為、共倒れの危険がある。そこで老老介護の負担を軽減する必要がある。本研究では multi Purpose mobility (以下、mPm)を用いた車いす介助の負担軽減に着目した。mPm と車いすを連結させることで、介助者が自らの足腰を使うことなく、車いすを操縦可能である。しかし、連結走行時には、操舵力が増加するという問題がある。操舵力の増加により、高齢者による操縦は困難である。そのため、操舵力の低減が必要である。本稿では、mPm の操舵力低減を目的とした駆動輪制御システムについて述べる。

2. mPm の旋回性能・必要操舵力の目標

2.1 旋回性能の目標

mPm は歩道を走行可能な乗り物として、シニアカーと類似する。そこで日本規格協会が定めたシニアカーの規格である「JIST9208」を参考に mPm の旋回性能の目標を決定した[1]。「JIST9208」では回転性能を測る試験として「幅 1.2[m]の直角路を前進で切り返しを行わずに走行する」と定めている。なお，走行時の速度は規定されていない。以上より、mPm においても同一の試験を達成することを目標とした。試験を達成可能な旋回半径は 0.875[m]である。

2.2 必要操舵力の目標

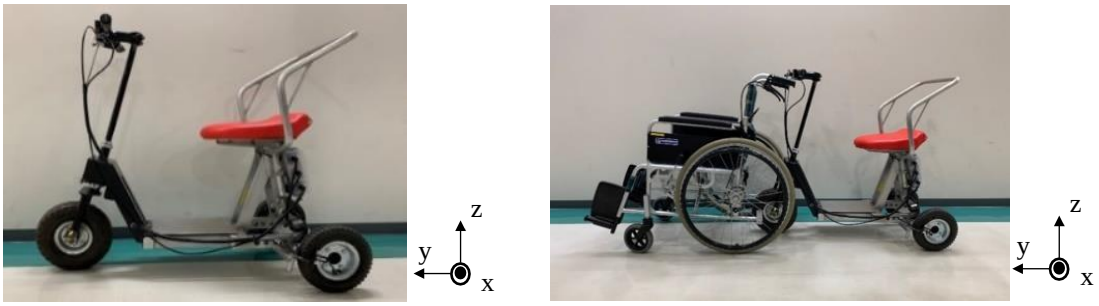
mPm は高齢者による操縦を想定している。従って，高齢者が操作可能な操舵力を目標値として決定する。操舵力の目標値の条件は次の 2 点である。「①高齢女性が問題なく操作可能であること」，「②過小な力では操作不可能であること」。①の条件は操作対象者の中で最も非力と推測する高齢女性が操舵可能である必要があるため設定した。
②の条件は微小な力でハンドルが動作すると操作が不安定となり危険なため設定した。

以上の条件を踏まえ，女性が発揮する力の大きさに関する先行研究を参考に操舵力の目標値を決定した[2]。mPm のハンドル操作に類似した機器操作において，高齢女性が「少し力を入れて操作した」と感じる操作力は 84.8[N]であった。従って，高齢女性が操作可能且つ過小な力では操作不可能な操舵力として 84.8[N]を目標値とした。mPmのハンドル操舵力として、ハンドル軸トルクに換算すると 15.3[Nm]である。

3. 操舵力の低減を目的とした mPm の改良

3.1 mPm

mPm は移動を支援する生活支援機器である。図 1(a)に mPm 単体，図 1(b)に車いすと連結した mPm を示す。



(a)mPm 単体　　(b)車いすと連結した mPm

図 1 mPm

mPm は 1 台で様々な場面に対応することを目的とした電動モビリティである。老若男女を利用対象としており，買い物や通院等，近距離移動の支援が可能である。利点は小型な事に加え，免許等の資格が不要で手軽に利用可能なことである。本学の mPm は車いすと連結することで、車いす介助の負担軽減が可能である。しかし、連結時に必要操舵力が増加するため，扱いにくい。そこで mPm の改良により改善を目指す。

3.3 改良コンセプト

mPm の改良コンセプトは「①車体の大型化を避ける」「②車いすは無改造」「③高齢者が容易に操作可能」の 3 点である。コンセプト①は車体の大型化による衝突リスクや取り回しの悪化を防止するため設定した。②は mPm が市販の車いすとの連結を可能とするために設定した。コンセプト③は身体機能や認知機能の衰えた高齢者の利用を想定し設定した。以上のコンセプトを満たすため， mPm の駆動輪である後 2 輪の回転数制御により、操舵力低減を目指す。

3.3 改良により実現する動作

mPm の左右の駆動輪の回転速度に差を発生させることで操舵力の低減が可能であると考える。回転速度差による操舵補助のイメージを図 2 に示す。

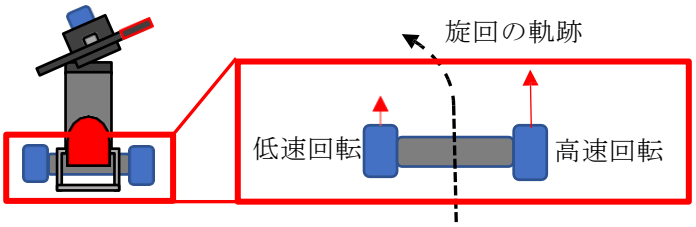


図 2 回転速度差による操舵補助のイメージ(左旋回)

図 2 に示すように、旋回時に外輪の回転数を上昇，内輪の回転数を減少させることで、各駆動輪の前進量に差を生み，旋回を行う。駆動輪による旋回により、ハンドルの操舵による旋回量は減少する。従って、操舵力が低減すると考える。

mPm の駆動輪にインホイールモータを採用した。インホイールモータはホイール内部に搭載されるモータを指す。インホイールモータの利点は 2 点ある。1 つ目は各駆動輪を独立制御しやすいことである。独立制御しやすいことにより， 各駆動輪の回転速度を柔軟に変更しやすい。2 つ目に省スペースであることが挙げられる。ホイール内部にモータを配置可能なことから，乗車空間や車載空間の拡大に繋がる。

4. 回転速度差による操舵力変化の検証

4.1 実験目的

駆動輪の回転速度差によって操舵力の低減が可能か検証を行う。

4.2 実験方法

mPm の走行性能目標である、幅 1.2[m]の直角路を走行する。駆動輪を等速回転、或いは回転速度差を発生させて旋回し、操舵力を測定する。図 3 に走行イメージを示す。

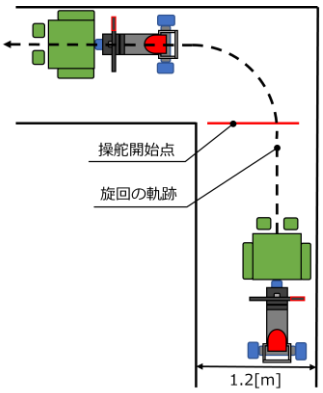


図 3 走行イメージ

図 3 に示すように左旋回で走行を行った。一様な旋回を行うために、直角路の外壁に沿うように走行した。初めに、設定した回転速度差で直進する。次に mPm の前輪が操舵開始線に達した瞬間に旋回を開始する。mPm が旋回路を脱出したら停車する。以上の流れの間、操舵力を測定する。計 4 通りの回転速度差でそれぞれ 5 回ずつ走行した。また、実験環境として、「車いすと mPm は連結状態」、「車いすには 60[Kg]の重りを積載」、「公道での走行を想定し、走行は法定速度である 6[km/h]以下」で行った。加えて、旋回走行であるため、4[km/h]以下の低速走行とした。表 1 に回転速度差を示す。

表 1 回転速度差

左後輪[km/h]	右後輪の回転速度差[km/h]
1.40	+0.03(等速回転)
	+0.74
	+1.47
	+2.21

4.3 検証方法

測定された操舵力の最大値を評価に用いる。回転速度差毎に、5 回旋回を行い、最大操舵力の 5 回平均を算出する。等速回転時と回転速度差を発生させた場合を比較し、操舵力の変化を確認する。

4.4 実験結果

それぞれの回転速度差で 5 回ずつ旋回した際の最大操舵力平均を算出した。表 2, 図 4 に最大操舵力平均を示す。

表 2　最大操舵力平均

回転速度差[km/h]	最大操舵力平均(n=5)[Nm]
0.03	73.8
0.74	60.0
1.47	74.6
2.21	74.2

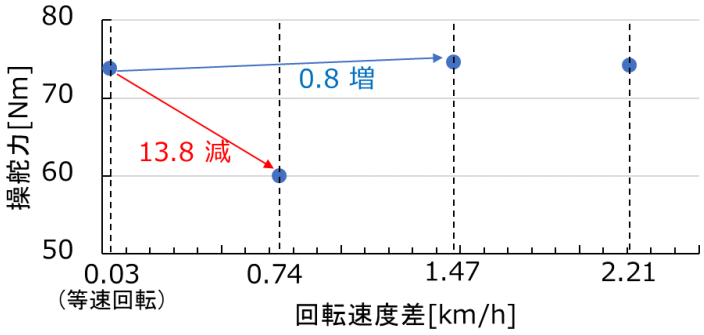


図 4 最大操舵力平均

図 4 から，等速回転時と回転速度差 0.74[km/h]を比較すると、操舵力が 13.8[Nm](18.6%)低減したことがわかる。従って、駆動輪の回転速度差により、操舵力の低減が可能である事が示された。しかし、1.47，2.21[km/h]では操舵力が僅かに増加した。

4.5 考察

等速回転時と比較して、回転速度差 1.47，2.21[km/h]で操舵力が増加した理由は走行速度の上昇が原因と考えられる。回転速度差が大きくなると走行速度が上昇する。走行速度の上昇から，旋回時の遠心力が増加する。mPm のハンドルに車いすの荷重が加わっているため、車いすに加わる遠心力が大きいほど操舵力が増加すると考えられる。図 5 に遠心力による操舵力増加のイメージを示す。

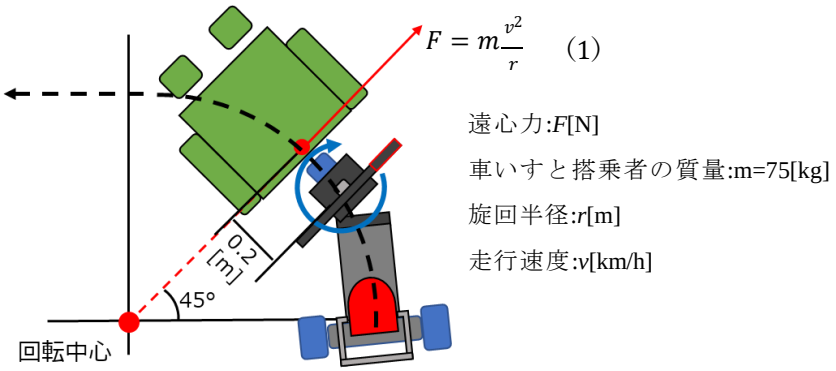


図 5　遠心力による操舵力増加のイメージ

旋回中、図 5 のように遠心力が発生する。走行中の遠心力を概算した。ただし、走

行速度は外輪の回転速度とし、旋回半径は 2[m]とした。初めに、本実験において最も低速走行であった 1.43[km/h]のとき、(1)式より、遠心力 F_1 は以下のようになる。

$$F_1 = m\frac{v^2}{r} = 75 \times \frac{1.43^2}{2} = 76.7[\mathrm{N}] \tag{2}$$

また、最も高速走行であった 3.61[km/h]のとき、遠心力 F_2 は以下のようになる。

$$F_2 = m\frac{v^2}{r} = 75 \times \frac{3.61^2}{2} = 488.7[\mathrm{N}] \tag{3}$$

(2),(3)式から、走行速度の増加により、遠心力が大きく増加することがわかる。走行速度が約 2.5 倍になると、遠心力は約 6.3 倍になっている。従って、旋回時は可能な限り低速走行することで、操舵力の低減が可能であると考えられる。また、(1)式から、旋回半径の大きさによって，遠心力が変化すると考えられる。従って、旋回半径の大きさにより、操舵力が低減する回転速度差は変化すると考える。そこで、回転速度差の制御方法として、旋回半径に合わせた回転速度差が変化するシステムを提案する。

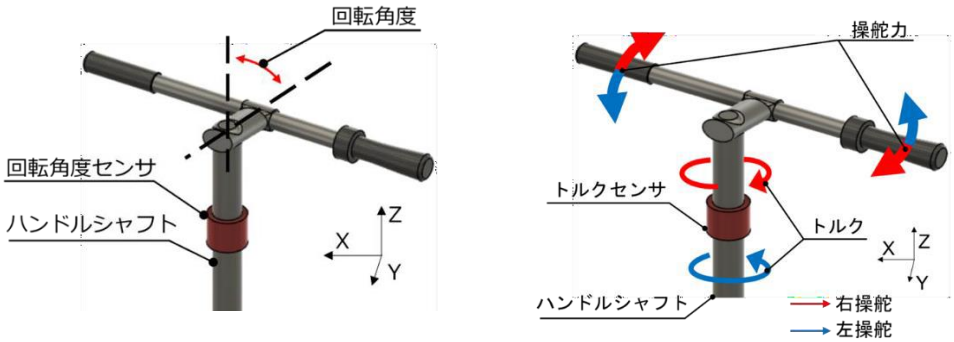
5. 駆動輪制御システムの提案

5.1 システム概要

提案するシステムは、旋回半径に合わせて回転速度差を自動制御するシステムである。本システムでは旋回半径に対し、操舵力が低減する回転速度差の割り当てを行う。

5.2 旋回半径・旋回方向の検出

提案するシステムでは、旋回半径と旋回方向を検出する必要がある。何故なら、旋回半径の検出により駆動輪の回転数増減量を、旋回方向の検出により内輪と外輪の判定を行う必要があるからである。旋回半径・旋回方向の検出はセンサを用いることで可能である。旋回半径の検出は mPm のハンドルシャフトの回転角度から推定可能である。また、旋回方向は mPm のハンドルシャフトに発生するトルクの向きから判定可能である。図 6 に旋回半径と旋回方向の検出イメージを示す。



(a) ハンドルの回転角度　　(b) ハンドルシャフトに発生するトルク

図 6 旋回半径と旋回方向の検出イメージ

図 6(a)のように、ハンドルシャフトに回転角度センサを取り付けることで、ハンド

ルの操舵角が検出可能である。操舵角から、旋回半径の推測が可能と考える。また、図6(b)より、mPm のハンドルシャフトにトルクセンサを取り付け，操舵時にシャフトに発生するトルクを測定する。ハンドルに加わる力の方向によって，　トルクの向きが変化するため内輪と外輪が判定可能である。本システムには、旋回半径に対する適切な回転速度差の決定が必要なため、操舵力が低減する回転速度差の検証を行った。

6.　操舵力が低減する回転速度差の検証

6.1　実験目的

様々な旋回半径に対して、最も操舵力が低減する回転速度差を検証する。

6.2　実験方法

4.2 とほぼ同様である。変更点は、旋回半径 0.875，1，1.5，2，2.5，3[m]の 6 通りのコースで行った点である。実験環境も同一であるため省略する。

6.3 検証方法

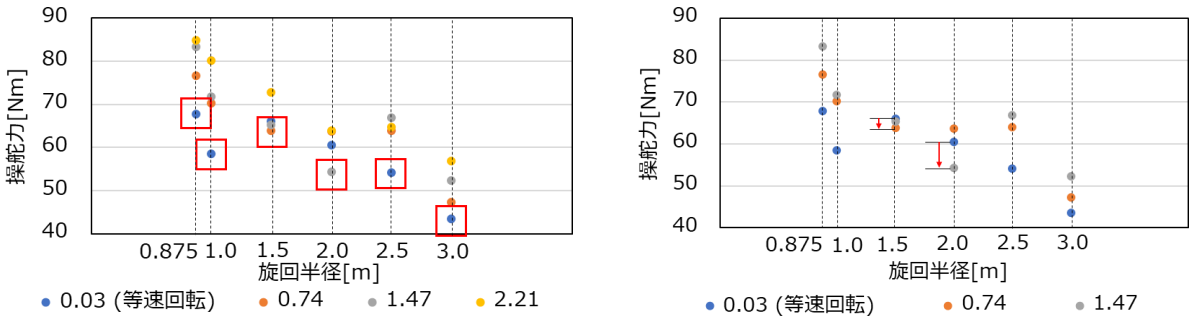
4.3 と同様。

6.4 実験結果

それぞれの旋回半径／回転速度差で 5 回ずつ旋回した際の最大操舵力平均を算出した。表 3，図 7 に最大操舵力平均を示す。

表 4　最大操舵力平均[Nm]

		旋回半径 [m]					
		0.875	**1.00**	**1.50**	**2.00**	**2.50**	**3.00**
回転速度差 [km/h]	**0.03**	67.7	58.4	66.0	60.4	54.0	43.4
	0.74	76.5	70.1	63.8	63.6	63.9	47.2
	1.47	83.3	71.7	65.2	54.2	66.8	52.2
	2.21	84.8	80.0	72.7	63.9	64.7	56.9



(a)最大操舵力が最小になる回転速度差　　(b)操舵力の低減量

図 7　最大操舵力平均

図 7 から、旋回半径 0.875，1.00，2.5，3.0[m]のとき、操舵力が最小になった回転速度差は 0.03[km/h](等速回転)であった。1.50[m]では 0.74[km/h]、2.00[m]では 1.47[km/h]であった。等速回転時と比較して、半径 1.5 ，2.00[m]では回転速度差を発生させることで、操舵力が低減している。しかし、半径 1.5[m]において、低減した操舵力は僅か 2.2[Nm](3.3[%])，2.00[m]では 6.2[Nm](10.2[%])であった。また、全ての旋回半径において、目標操舵力 15.3[Nm]大きく及ばない結果となった。従って、駆動輪の制御方法の

再検討が必要である。そこで、旋回時に内輪を駆動させず、空転させ、外輪のみ駆動させることで、より操舵力が低減すると考えた。

7. 片輪走行における操舵力測定

7.1 実験目的

更なる操舵力低減を目的として、外輪駆動による操舵力測定を行う。

7.2 実験方法

6.2 と同様である。ただし、駆動輪の回転速度差のみ変更した。回転速度差は全 3 通りである。表 5 に回転速度差を示す。

表 5　回転速度差

左後輪[km/h]	右後輪[km/h]
0	1.43
	2.14
	2.87

7.3 検証方法

6.3 と同様。

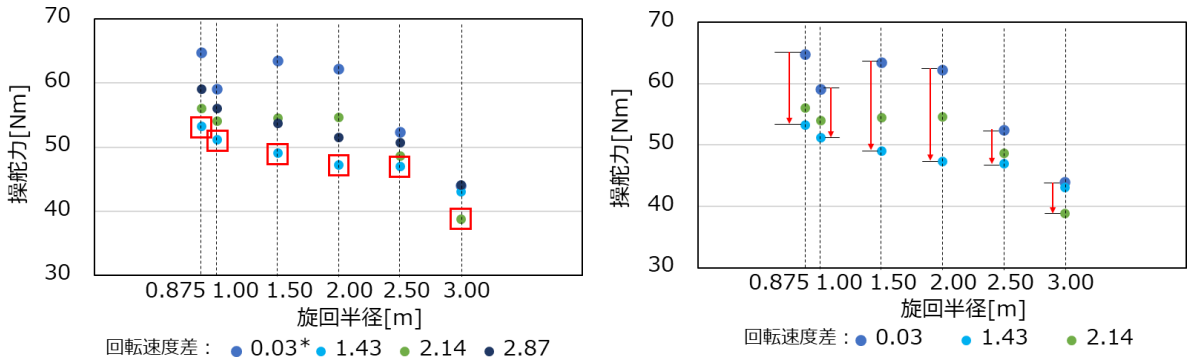
7.4 実験結果

それぞれの回転速度差で 5 回ずつ旋回した際の最大操舵力平均を算出した。表 6，図 8 に最大操舵力平均を示す。

表 5　最大操舵力平均[Nm]

		旋回半径 [m]					
		0.875	**1.00**	**1.50**	**2.00**	**2.50**	**3.00**
回転速度差 [km/h]	**0.03***	67.7	58.4	66.0	60.4	54.0	43.4
	1.43	53.3	51.2	49.1	47.3	47.1	43.1
	2.14	56.1	54.1	54.6	54.6	48.7	38.9
	2.87	59.1	56.1	53.7	51.6	50.7	44.2

*実験 2 の等速回転時の結果



(a) 操舵力が最小になる回転速度差　　(b) 操舵力の低減量

図 8 最大操舵力平均

図 8(a)より、旋回半径 0.875，1.00，1.50，2.00，2.50[m]のとき、操舵力が最小にな

った回転速度差は 1.43[km/h]であった。3.00[m]では 2.14[km/h]であった。図 8(b)より、等速回転時と比較して、最も操舵力が低減したのは半径 1.5[m]で 16.9[Nm](25.6[%])低減した。また、最も操舵力の低下が小さかったのは半径 3.00[m]で 4.5[Nm](10.3[%])であった。以上より、両輪走行と比較して片輪走行は大きく操舵力が低減することが確認された。

7.5 駆動輪制御への応用

本実験では旋回半径は主に 0.5[m]ずつ変化させたため、旋回半径 2.5~3.0[m]において、回転速度差 1.43，2.14[km/h]どちらで最小操舵力になるか不明である。従って、仮に旋回半径 2.5~3.0[m]において、操舵力が一次関数的に変化するとして考察を行った。図 9 に回転速度差 1.43，2.14[km/h]の操舵力変化を示す。

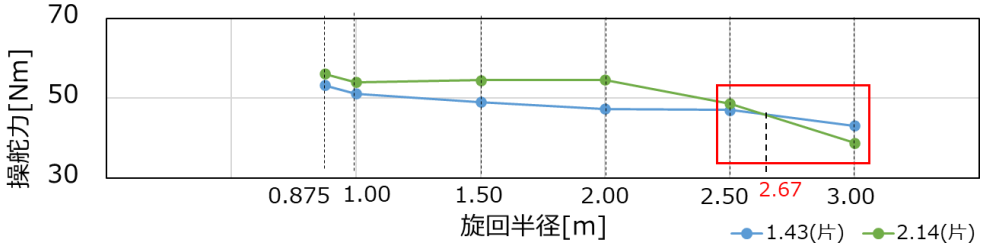


図 9 回転速度差 1.43，2.14[km/h]の操舵力変化

回転速度差 1.43[km/h]における操舵力f_1は以下のようになる。

$$f_1 = -8r + 67.1 \tag{4}$$

回転速度差 2.14[km/h] における操舵力f_2は以下のようになる。

$$f_2 = -19.6r + 97.7 \tag{5}$$

(4),(5)式の交点は(2.64，46.0)であるため、旋回半径 0.875~2.64[m]で回転速度差 1.43[km/h]，旋回半径 2.6[m]以上で回転速度差 2.14[km/h]に駆動輪を制御することで、あらゆる旋回半径において最小操舵力で旋回することが可能になる。

8. 結言

本稿では mPm と車いすの連結走行における走行性能の目標値，mPm の改良案，操舵力測定実験について述べた。実験結果から，回転速度差を設けることで最大 25.6[%]操舵力を低減可能である事が示された。また、旋回半径 0.875~3.00[m]において、最小操舵力で旋回可能な回転速度差を示した。今後の展望として、更なる操舵力低減のための駆動輪動作の検討、駆動輪制御システムの詳細設計が挙げられる。

参考文献

[1] 日本産業標準調査会，ハンドル形電動車椅子，JIST9208
[2] 徳田哲男，児玉桂子，“押引および回転操作機器の操作高と操作力に関する年代的特徴”，人間工学 Vol. 28, No.2 ('92)