

〔研究論文〕

## 高齢者用電動アシストカートの開発

丸山 次人<sup>1)</sup>, 針生 重好<sup>2)</sup>

### Development of Electrical Assistance Cart for Elderly Persons

Tsugito MARUYAMA<sup>1)</sup>, Shigeyoshi HARIU<sup>2)</sup>

#### Abstract

Japan is fast becoming an ageing society. A Force-driven Electrical Assistance Cart was developed for elderly and disabled persons. The cart can be operated at a constant 5N force regardless of slope gradient and load weight by electrical assistance. However the 1-version prototype cart has some necessary improvements as its sudden start and unstable movement. In order to effect these improvements, the 1.5-version prototype of the cart was developed. We confirmed that the sudden start can be restrained by moving average processing and the running direction can be maintained by averaging left and right forces under unbalanced states. For safety when releasing both hands from the handles at going downhill, an auto-stop brake function was also incorporated into the 1.5-version prototype.

#### 1 はじめに

今日我が国は超高齢化社会を迎えようとしており、2013年度から国主導のロボット介護機器開発導入事業が5ヵ年計画で開始されている。テーマは5つで、その一つに「移動支援」(自立支援シルバーカート)がある。この移動支援の課題は、走行安定性と段差乗越えの両立である。

大学の研究として、王ら<sup>1)</sup>や西沢ら<sup>2)</sup>は屋内でのリハビリ用の歩行支援機の研究を、また小浦ら<sup>3)</sup>や入部ら<sup>4)</sup>は、各々目の不自由な方あるいは家庭での酸素療法患者用の歩行支援機の研究を進めている。一方、市販の高齢者用電動アシストカートについては、RT.WORKSのRT.1<sup>5)</sup>や(株)幸和製作所のリトルキーパス<sup>6)</sup>が発売されている。それらは走行安定性に優れているが、段差乗越えについては考慮されていない。

現在65歳以上の高齢者は4人に1人の割合であるが、15年後には3人に1人の割合になることが予想されている。日本の住宅地は傾斜部に造成されている場合が多く、足の不

---

1) 東北工業大学 工学部 知能エレクトロニクス学科 教授

Professor of Department of Electronics and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

2) 東北電子産業株式会社 マネージャー

Manager, Tohoku Electronic Industrial CO. Ltd.

自由な方や高齢者には、急坂などの地形的問題で買い物や隣近所への訪問などの外出でも控えがちになり、健康維持が難しくなっている。そこで、その高齢者にとって最も身近な運動である歩行を補助する、力操作型電動アシストカートの開発を目指して、研究を進めている。安定走行と段差乗越えの2つの機能を実現するために、以下の開発ステップで進めている。

＜開発ステップ＞

ステップ1：1号機の開発（市販カートの電動化）

ステップ2：1.5号機の開発（安定走行機能の実現）

ステップ3：2号機の開発（安定走行と段差乗越えの両機能の実現）

本稿では、第2章と第3章で1号機の開発および性能の評価結果について報告する<sup>7</sup>。第4章では、1号機の問題点と改善策についてまとめ、第5章で改良した1.5号機の性能評価について言及する<sup>8~10</sup>。

## 2 電動アシストカートの機構

本研究では、段差乗越えと自動ブレーキ機能を持ち、評価の高いシルバーカート（キャリースルーンXL：マキライフテック製）を基に電動化の改造を行った。図1に電動化したカートの外観、操作部、および駆動部を示す。このカートは後輪左右独立駆動（図1（c））で、ハンドル部は左右で独立しており、各々に圧力センサを前後に2つ配置している。これにより、ハンドルを前方に押すと前進、手前に押すと後退し、この組合せにより右左折する仕組みとなっており、直観的な操作性を実現している。

モータはセンサに加えられた力に比例して回転速度が変化する。高齢者の歩行能力を考慮して、歩く速度を最大60cm/s（2 km/h）と仮定し、モータの回転速度を約2,500rpmとした。この仕様を満足するモータとして、高効率・省エネ・高耐性を有するブラシレスモータを採用した。

## 3 電動カートの基本性能の評価

### 3.1 基礎実験

#### (1) 斜度の影響評価

まず、電動化による効果について、坂道における初期駆動力（初期駆動に必要な力）を評価指標として電動化前後で比較した。ここで、荷重は無しとし、屋内の斜度5°と10°、材質はベニヤの場合、屋外の斜度7°、材質はアスファルトの場合について実験を行った。

表1に初期駆動力と低減率を示すとともに、グラフを図2に示す。図2の結果から、モータのアシストによって、斜度に関係なく、一定の駆動力、約5 Nで操作できることが分かった。

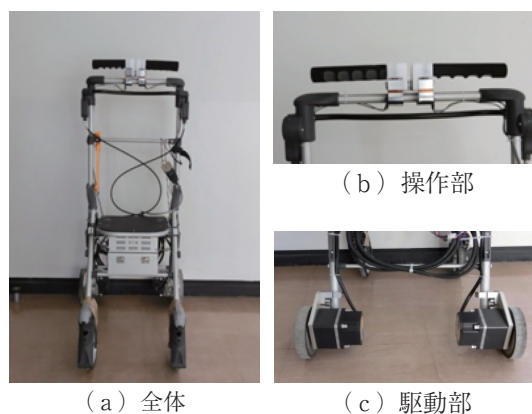


図1 電動アシストカート1号機

表1 電動化前後における初期駆動力

	電動化前(N)	電動化後(N)	削減率(%)
5° (屋内)	9.8735	4.9784	49.6
7° (屋外)	13.23	4.6452	64.9
10° (屋内)	17.224	4.8608	71.8

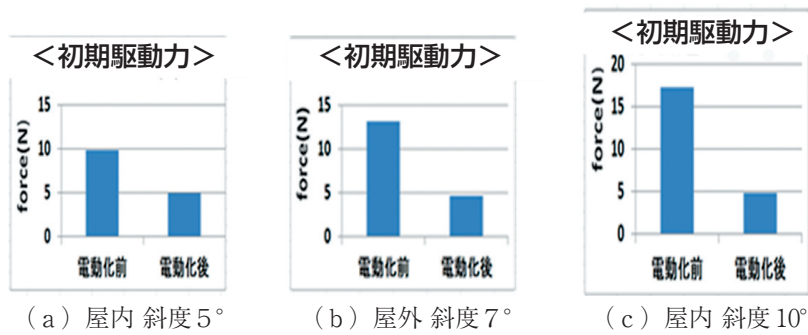


図2 斜度における初期駆動力

(2) 荷重の影響評価

次に、斜度5°、材質ベニヤの場合において、荷重を10, 20, 30kgと変化させた場合の影響を調べた。図3にその結果を示す。

図3から明らかのように、モータのアシストによって、荷重の大きさに関係なく、駆動力は一定の約5Nで操作できることが分かった。

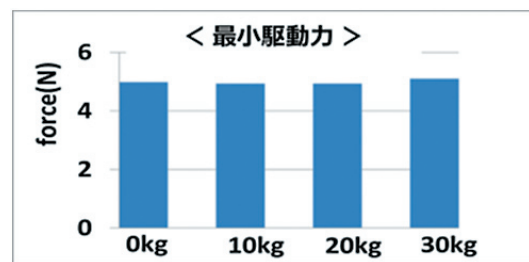


図3 荷重有の場合の初期駆動力（斜度5°）

3.2 4つの力センサの評価

(1) 力センサのゲインの影響

4つの力センサ値とモータへの電圧指令値の関係を図4に示す。その式を以下に示す。

$$Lm = Kl \times Lf \quad (Lf \geq Lb) \quad (1-1)$$

$$\text{or } Kl \times (-Lb) \quad (Lf < Lb) \quad (1-2)$$

$$Rm = Kr \times Rf \quad (Rf \geq Rb) \quad (2-1)$$

$$\text{or } Kr \times (-Rb) \quad (Rf < Rb) \quad (2-2)$$

ここで、Lf, Lb, Rf, Rbは力センサ値, Kl, Krはモータのゲイン, Lm, Rmはモータへの電圧指令値である。

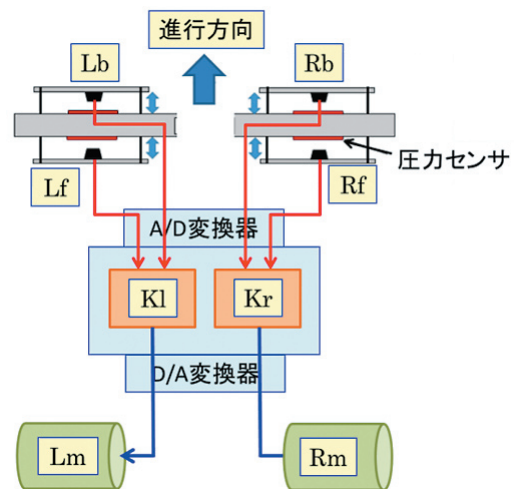


図4 力センサの構成

モータゲイン Kl, Krは1.0を基準として、0.5～2.0に変化させた場合の初期駆動力への影響を調べ、その結果を図5に示す。1.0よりゲインを小さくすると、電動カートを動かすために必要な初期駆動力は大きくなり、1.0よりゲインを大きくすると、初期駆動力は小さくてよいことが分かる。すなわち、ゲインを大きくすることで、小さい力でカートを動かすことができることを示している。ただし、ゲインを1より

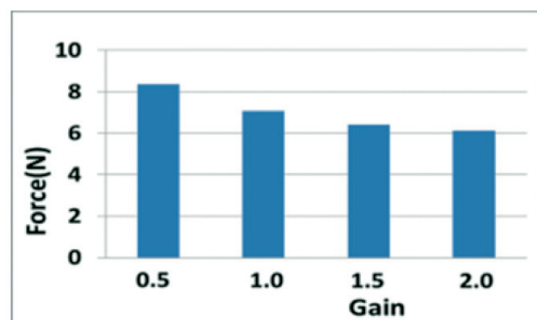


図5 モータゲイン変化による初期駆動力

大きくしたとき、モータに印加する電圧の上限が3.3 Vを超える場合には飽和するように設定して安全性を確保している。

## (2) 右左折時のハンドル操作

カートの操作性を評価するため、右左折時の4つの力センサの出力を測定し、横軸を時間、縦軸を力センサ値として、4つの力センサの値を図6、7にグラフを示す。ここで、前方に働く力をプラスの値とした。図6では、右折するとき右ハンドルをバック側に倒し、左ハンドルをフロント側に倒している（FB方式）。一方、図7では、左右のハンドルをフロント側に倒して右折している（FF方式）。この右折時のカートの軌跡を図8に模式的に示した。

図8から明らかのように、FB方式の方がFF方式より回転半径が小さくコンパクトに回っている。これにより、FB方式の方が曲がり易いといえる。

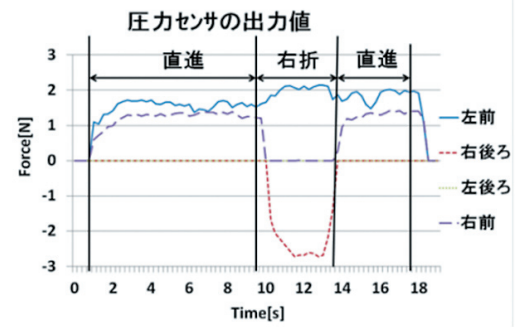


図6 右折時（フロント×バック：FB）

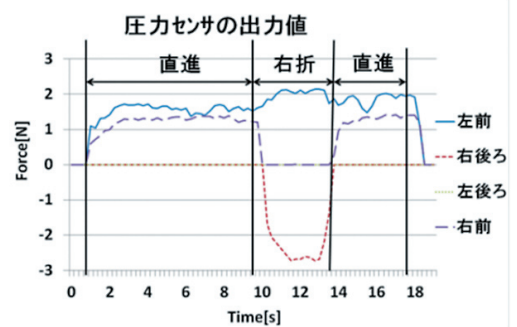


図7 右折時（フロント×フロント：FF）

## 4 1号機の問題点と改良策

1号機では、不安定な走行の動きが発生する問題や、高齢者や足の不自由な方にとって、始動時の急な発進は危険であり、また直進時に左右のハンドルを均等に押せないという課題があった。そこで本稿では、ハードウェアでは操作機構の改良を、ソフトウェアでは走行プログラムの改良を行い、電動アシストカート1.5号機（カンパニユラ）を開発した。その外観写真を図9に示す。また力センサ入力からモータ指令電圧値までのモータ制御処理フローを図10に示す。すなわち、

- ① 不安定な動き  
⇒力センサの取付け位置を変更
- ② 始動時の急な発進の抑制  
⇒移動平均化処理
- ③ 左右力センサ値の不均一の解消  
⇒左右平均化処理

の3点について、改良を行った。

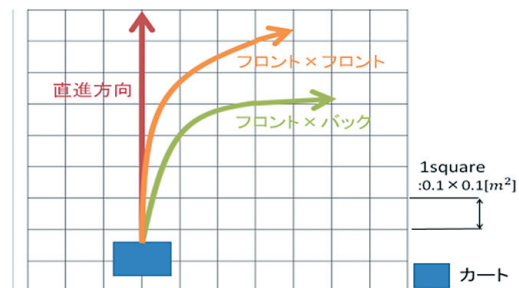


図8 右折時の電動カートの軌跡

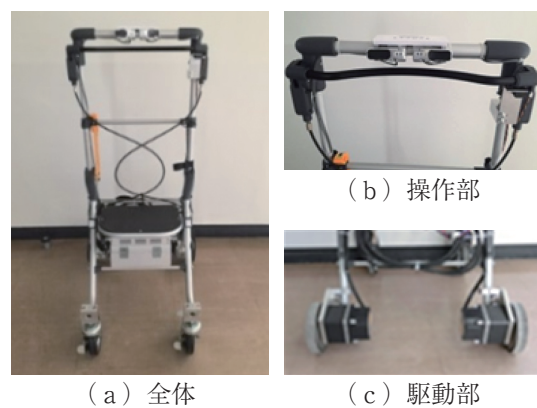


図9 電動アシストカート1.5号機

さらに、安全機能として、下り坂で両手を離した際、モータのブレーキを利用して、④自動停止する機能を実現した。

### 5 1.5号機の改良性能の評価

改良点の効果を実験により、評価した。

#### 5.1 基本性能評価

##### (1) 加重実験

1号機では、操作ハンドルの鉛直方向の力が進行方向の力に変換され、不安定な動きを発生していた。そこで1.5号機では握りバーの側面に操作機構（力センサ）を配置して解消を図った。その効果を操作機構に鉛直方向に錘を吊るして力センサの出力を測定した。その結果を図11に示す。

図11の結果から、1号機では鉛直方向の重さが進行方向の力に変換されて力センサに出力されるが、1.5号機では出力されていない。これにより、1.5号機の操作機構の改善効果を確認した。

##### (2) 始動時の急発進の抑制実験

始動時に力センサを急に押した場合でも、急発進を抑制するために、力センサ出力に（3）式で表す移動平均化処理を施した。

$$\tau(i+1) = K_1 \frac{f(i) + f(i+1) + \dots + f(i-N+1)}{N} \quad (3)$$

ここで、 $\tau$ はモータトルク指令値、 $K_1$ はゲイン、 $f$ は力センサ出力、 $N$ は平均化回数である。

移動平均化回数を0, 5, 10回の3段階に設定し、力センサへの入力を0Vからボタンを急に押して、最大押し込んだ時のモータへの電圧指令値を測定し、その結果を図12に示す。

図12から分かるように、初期立ち上がり時間は、移動平均化回数が0回の場合には約0.2s, 5回では約0.6s, 10回では約1.1sと、平均回数を増やすことでモータへの電圧指令値の立ち上がりが遅くなる。これにより、平均回数を増やすことで急な発進を抑制できることを確認できた。

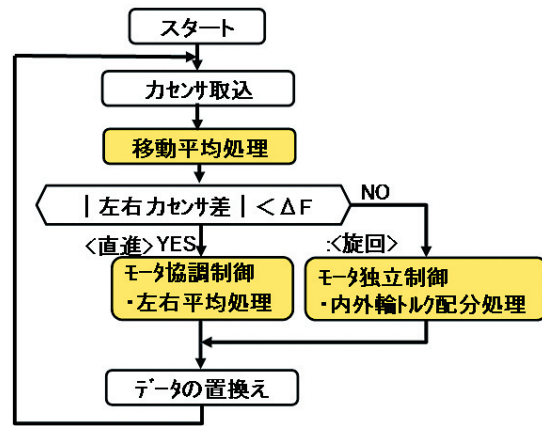
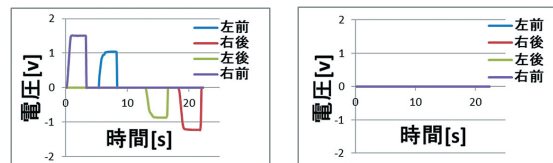


図10 モータ制御処理フロー



(a) 1号機

(b) 1.5号機

図11 錘による力センサの反応

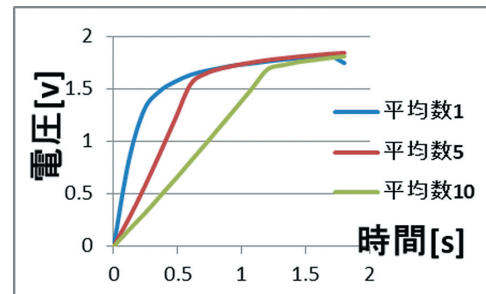


図12 移動平均による始動時のモータ指令値の変化

## 5.2 直進性と旋回性評価

### (1) 直進性評価実験

直進したい場合、高齢者や足の不自由な方にとって、左右の力センサに力を均等に加えることは難しい。そこで、(4)式で示す左右力センサの平均化処理をプログラムに組込むことにした。

$$\tau(i+1) = K_2 \frac{f_L(i) + f_R(i)}{2} \quad (4)$$

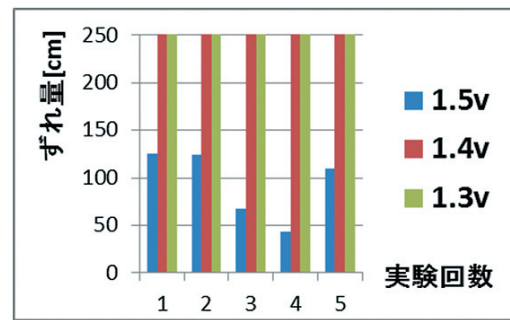
ここで、 $\tau$ はモータトルク指令値、 $K_2$ はゲイン、 $f_L$ と $f_R$ は各々左右の力センサ出力である。屋外での使用を考慮して、外乱のある石畳で実験した。スタート地点から直線10m離れた地点を目標にして、力センサへの入力アンバランス状態を再現してカートを手動走行させて、目標地点からのズレ量を測定した。ここで、アンバランス状態は、左のモータへの指令値を1.5Vと固定し、右のモータへの指令値を1.5V、1.4V、1.3Vの3段階に変えて測定した。

なお、カートを手動走行して実験を行った理由は、ヒトによる主観を排除して客観的評価を行うためである。実験結果を図13に示す。

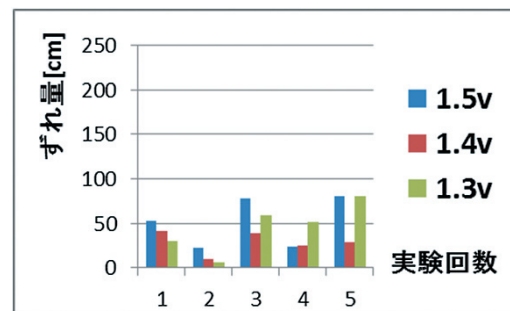
図13から、両方の入力が等しい場合はどちらも目標からわずかにずれた状態で到着するが、左右平均化を組んでいない場合は入力値のわずかな差で目標までたどり着くことができないが、逆に組んでいる場合は入力値に差があっても目標の近くにたどり着くことが分かった。このことから、左右平均化プログラムの直進性の効果を確認した。

### (2) 旋回性評価実験

操作性の観点から、直進から旋回、旋回から直進への円滑な切替えが重要である。その方式として、左右モータへの電圧指令値(トルク指令値)を直進から旋回に切替わった際の電圧指令値を基準にして、外輪側を一定量増加N%、内輪側を一定量減少-N%とするトルク配分方式を採用した。この方式の有効性を確認するために、左右モータへの電圧指令値は0.5V、1.0V、1.5Vの3ケースにおいて、トルク配分比N%を10~20%の間で変化させて、曲がり角を自動走行させ中心位置からのズレ量を評価した。その結果を図14に示す。いずれの基準電圧値においても、トルク配分比を概ね15%とすることで中心からのズ



(a) 左右平均化なし



(b) 左右平均化あり

図13 アンバランスな力での出力

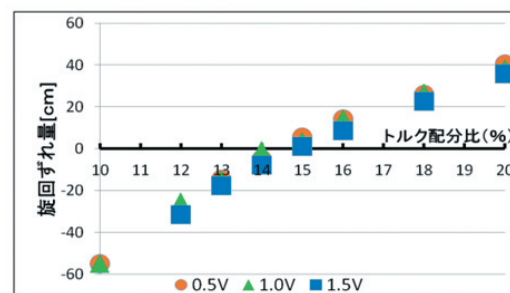


図14 トルク配分比によるズレ量

表2 被験者による旋回性の評価

	10%	15%	20%
0.5V	0人	4人	1人
1.0V	0人	3人	2人
1.5V	0人	5人	0人

レが少なく円滑な旋回が可能であることを確認した。

### (3) 自動運転時の操作感覚の評価

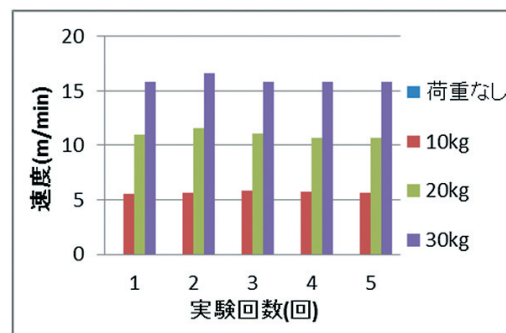
前節の定量評価で得られたトルク配分比15%の妥当性を検証するために、人による評価を行った。すなわち、15%が人の操作感覚と合致しているかについて評価した。トルク配分比を10%、15%、20%に設定して、操作感覚を調べた。ここで、被験者は20才代の男性5名である。その結果を表2に示す。いずれの場合も15%が良いと答えた割合が高く、旋回時のトルク配分比は、15%程度とすることが望ましいといえる。

### 5.3 下り坂での自動停止実験

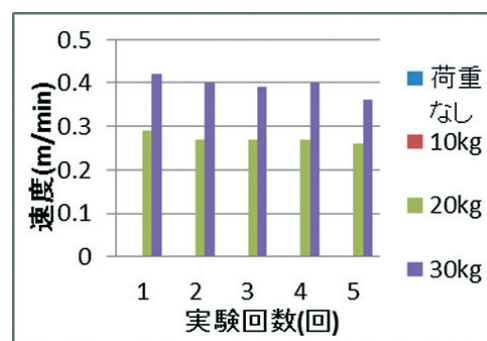
1.5号機では、下り坂で両手を離れたとき、モータのブレーキを利用して自動停止する機能を実現した。

屋外の斜度7°の坂道で実験を行った。スタート地点から5m離れた地点を目標にして、1号機と1.5号機各々に荷重0、10、20kgをかけ、自由滑走させたときの時間を計測して速度を求めた。その結果を図15のグラフにまとめた。

図15(a)から、1号機の場合は荷重なしで動くことはなかったが、10kgで5m/min、20kgで10m/minの速度で動いた。一方、図15(b)から、1.5号機では10kgまでは動くことはなかったが、20kgのときに0.3m/minで、1号機と比べて速度が1/40に抑制されていた。この結果、1.5号機で実現した自動停止機能は十分なものであるといえる。



(a) 1号機



(b) 1.5号機

図15 カートの滑走速度

### 5.4 病院による検証実験

ヒトによる客観的評価として、仙台赤十字病院のリハビリテーション科の医師、看護婦、医療スタッフの方々約20名による1号機と1.5号機についての評価を行った。評価の観点、操作性と安全性である。

操作方式に関して、1号機のハンドル式か、1.5号機のボタン式かについて評価を行い、1.5号機の方が操作しやすいとの回答が1:4が多かった。その他、操作機構の単純化、高齢者の歩行能力に合わせた速度調整、握ったときブレーキが掛かる機能、軽量化などの要望があった。有益な助言を得ることができた。

## 6 まとめ

高齢者や足の不自由な方のための力操作型電動アシストカートを開発した。性能評価実験により、電動化によって、坂道の斜度や荷重に無関係に、一定の初期駆動力5Nで駆動できることを確認した。

右左折時には、内輪側を手前側に、外輪側を前進側に押すことで、コンパクトに曲がれることが分かった。また、マイコンによりモータへのゲインを調整することで、初期駆動力を低減できることを確認した。これは急な坂道に遭遇した際に有効となる機能である。

1.5号機の改良において、ハード的には、操作機構の改善により、体重と前進力の分離を確認した。ソフト的には、移動平均化処理により急発進の抑制を、左右平均化処理により直進性の向上を実現した。さらに、安全のために、下り坂での両手を離したとき、自動停止機能を実現した。

仙台赤十字病院での検証実験により、操作機構はボタン式が優れていること、また速度調整、ブレーキロジック、軽量化などの助言を得ることができた。今後、仙台赤十字病院の助言機能を実現するとともに、使用者の歩行能力に応じて速度調整する機能の実現を図っていく予定である。

### 謝辞

仙台赤十字病院の北純副院長には、1号機と1.5号機に関する検証実験の機会を設定していただき、リハビリテーション科の医師、看護師、医療スタッフの皆様から大変貴重なご意見を頂戴することができました。ここに深く感謝致します。

### (参考文献)

- 1 王, 石田, 藤江, 「インテリジェント歩行支援機の走行制御」, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 3C2-05, 2013
- 2 Nishizawa et al, "Development of the Walking support Robot Equipped with Force Detecting System", pp.2696-2698, SICE2013
- 3 小浦, 木屋, 「ニューラルコントローラを用いた視覚障がい者のための歩行器型ガイドロボットの開発」, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2I2-04, 2013
- 4 入部, 上殿, 石川, 「力制御を用いたHOT患者の外出支援用アシストカート」, ロボティクス・メカトロニクス講演会2014, 1A1-E03, 2014
- 5 <https://www.rtworke.co.jp/product/rtl.html>
- 6 <https://www.tacaof.co.jp/keepace/>
- 7 及川, 丸山, 「足の不自由な方のための電動アシストカートに関する性能評価」, 平成27年東北地区若手研究者研究発表会, YS-13-P53, 2013
- 8 稲森, 丸山, 「足の不自由な方のための電動アシストカートの安定走行に関する基礎的検討」, 平成28年東北地区若手研究者研究発表会, YS-14-P38, 2016.
- 9 菅野, 丸山, 「高齢者用電動アシストカートの直進性と旋回性の評価」, 平成28年度東北地区電気関係学会, 2C02, 2016
- 10 T. Maruyama, S. Hariu, and I. Hozumi, "Development of Electrical Assistance Cart for Elderly Persons", International Conference of Business and Industrial Research, pp.25-30, ICBIR2016.