

O2-13

患者の体重を補償することにより小さな力で座高の調節可能な車椅子の開発

Development of Wheelchair with Mechanical Gravity Compensation System to Permit Easy

Adjustment of Seating Height by Small Power

○渡辺雄治(名工大), 中山学之(名工大), 荒木洋輔(三菱電機エンジニアリング), 大庭辰誕(名工大),

圓尾裕造(名工大), 藤本英雄(名工大)

Yuji WATANABE, Nagoya Institute of Technology
Takayuki NAKAYAMA, Nagoya Institute of Technology
Yosuke ARAKI, Mitsubishi Engineering Corp.
Tatsuhiko OBA, Nagoya Institute of Technology
Yuzo MARUO, Nagoya Institute of Technology
Hideo FUJIMOTO, Nagoya Institute of Technology

Abstract: In the home care, to ease the physical strain in the transfer task is one of the most serious problems. This paper proposed new wheel chairs with the gravity compensation systems which permit the easy adaptation of the seating height with slight power by compensating the patient's weight almost exactly. Since the proposed gravity compensation systems are composed of the passive elements such as the springs and rubbers, they have the remarkable advantages over the previous electric-powered wheelchairs in the sense that they are lighter, washable and foldable. To show the effectiveness of the proposed wheelchair, the performance evaluation through the generated force sensing and the organoleptic evaluation using the electromyography were executed. It was shown that the prototype of the proposed wheelchair can generate the gravity compensation force almost exactly at any seating height and alleviate the strain of the patients in the transfer dramatically.

Key Words: Gravity compensation, Wheelchair, Home care

1. 緒言

脚に運動疾患を有する患者は年々増加の一途をたどっており, より快適でリハビリ治療に効果的な車椅子の需要が年々増している. そのため, これまでにリクライニング機能や座高調整機能をはじめ, 障害物回避機能, ナビゲーション機能, 階段昇降機能までを有する高機能な車椅子が開発されてきた.

しかし一方で, 高齢者の在宅介護においては, トイレに行くなどの日常的な動作の中を行うにも, 毎回介護者に支援を頼まなければいけないことにより患者にかかる精神的な負担の大きさが問題になっており, 可能な限り患者自らの力で日常生活を行うことが可能で, なおかつ経済負担も少なく, 軽量・コンパクトで一般家庭でも容易に導入することが可能なパワーアシスト付き車椅子の開発が望まれている.

従来のパワーアシスト付き車椅子はほとんどのものが電動であったが, 電動車椅子は重量が重く, また水洗いするときにはモータに水がかからないようにしなければならない, 折りたたみが不可能なためコンパクトに収納することができないなど, 日本のように狭く段差の多い家屋の中で使用するには不便な点が多かった. また, 電動の機械には誤作動の危険性があるため, 特に高齢者が一人で使用することは安全面でも問題があった.

そこで, 本研究では, モータを使わずに, バネやゴム等の受動要素のみを用いて患者の体重を任意の座高で補償することで, 患者自身で容易に座高を調整し, 任意の高さの場所へ移乗することを可能にする車椅子の開発を目指した. 本研究で開発した装置は, モータの代わりに軽量のバネやゴムを用いてパワーアシスト力を生成するため, 重量が軽

く, 丸ごと水洗いすることが可能で, 折りたたみも可能という特徴を有する.

2. バネを駆動力とした自重補償機能付き車椅子

本章ではバネを駆動力に用いて任意の座高で患者の体重を補償することにより, 筋力の低下した患者でも任意の高さの場所へ容易に移乗することを可能にする, 軽量・コンパクトな自重補償機構付き車椅子の設計を行う. 本章では体重 60kg の患者を想定し, 通常車椅子の座面から高低差 15cm 以内の場所への移乗を可能にすることを考える.

本章で考案するようなバネの復元力のみを用いて患者の体重を支える福祉機器に関しては近年, 盛んに研究され, 森田らはバネの復元力を用いてリンク機構の自重を任意の姿勢で完全に補償する機械式自重補償機構を開発し, それを応用して上肢に働く重力を完全に補償することのできる車椅子を開発している⁽¹⁾. さらにまた, これとは独立に, Herder らも上肢に障害のある人が小さな力で物を持つことを可能にする車椅子としてを開発しており⁽²⁾, 患者が使用しやすいようにデザインの工夫をすることで, 臨床的にも高い評価を受けている.

一方, 下肢の自重補償装置としては Banala らが人に装着型の機械式自重補償装置⁽³⁾や我々が以前開発した機械式のパワーアシスト装置⁽⁴⁾がある.

しかし, これらの装置で補償可能な重量は高々数 kg しかなく, 我々が考えているような体重のほとんど (60kg 程度) を補償することのできるような車椅子はこれまでのところ実現されていない. 一方, 機械式自重補償装置を生産ラインや産業用リフターへ応用する研究も盛んにおこなわれているが^{(5),(6)}, これらの産業用の装置自体は大きな補償力を

生成することができる反面、装置が大きく、また摩擦も大きいいため、これらの構造を高齢者用の車椅子にそのまま応用することはできない。車椅子に搭載可能な機械式自重補償機構には、

- ・摩擦が十分に小さく操作性が良い
- ・軽量・コンパクトで持ち運びが容易
- ・薄型で折りたたみが可能
- ・60kg 程度の補償力を生成可能

という性質を有することが望まれる。そこで本章では中川らによって提案された、縦横2本のバネにより自重補償を実現する、「等圧縮力バネ機構」⁽⁷⁾を改良することで、従来の機械式自重補償機構に比べてコンパクトで薄型の自重補償機構を新たに開発し、それにより、折りたたみも可能で軽量の自重補償機能付き車椅子を実現することを考える。

中川らの等圧縮力バネ機構では縦横方向に張った2本のバネを駆動力とすることにより、座面の上下動に対するバネの伸長量を大きくすることができるため、小さいばね定数のバネを用いて大きな重量の補償を行うことができるが、X字で組まれたリンク機構の下端を下面にあるレールにそってスライドさせる構造が必要になるため、補償重量の増加に伴い、大きな摩擦抵抗が生じてしまうという欠点があった。またこの機構をそのまま車椅子に採用した場合には座位が下がることでリンクが外に突き出て、患者に危害が加わってしまう可能性もあった。

そこで、本研究では Fig.1 に示すような自重補償機構を新たに開発した。

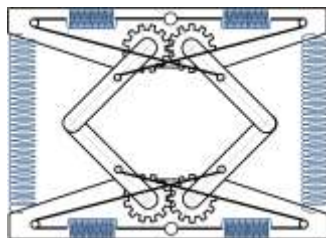


Fig. 1 Compact mechanical gravity compensation system

本装置は一端にギヤを固着させた4本のリンクがフリージョイントで上下の板と枢着された構造をしており、座面を下方に押し下げることによって、中央部のリンクがひし形に変形することを特徴としている。また、各リンクのギヤから等距離 h の点と、上下の板中央の点間に1回の折り返しを経てバネが張られており、これらの横方向に配置された4本のバネは、座面を下方に押し下げることによって、それぞれ等しい長さだけ伸長させられる。また、それと同時に左右両端に縦方向に配置されたバネは圧縮させられる。

このとき中央部リンクの鉛直方向からの傾斜角を θ 、リンク長を L 、上下の板中央の点と左右折り返し点間の距離を a 、横方向に配置したバネのバネ定数を K_1 、縦方向に配置したバネのバネ定数を K_2 すると、横方向に配置した4本のバネには

$$U_1 = 2K_1(\sqrt{a^2 + h^2 + 2ah \sin \theta} - \sqrt{a^2 + h^2})^2 \quad (1)$$

$$\approx 2K_1 h^2 \sin^2 \theta$$

の弾性エネルギーが、縦方向に配置した2本のバネには

$$U_2 = K_2(2L(1 - \cos \theta))^2 \quad (2)$$

の弾性エネルギーが蓄えられることになるから、天板の質量を M として、重力エネルギーも含めた系全体のポテンシ

ヤルエネルギーは、

$$U = 2K_1 h^2 \sin^2 \theta + 4K_2 L^2 \cos^2 \theta + 4K_2 L^2 (1 - 2 \cos \theta) + 2MgL(\cos \theta - 1) \quad (3)$$

で与えられることになる。従って、

$$K_1 = \frac{MgL}{2h^2}, \quad K_2 = \frac{Mg}{4L} \quad (4)$$

を満たす時、

$$U = 0 \quad (5)$$

となって、直立位置から任意の高さまで座面を外力なしで移動させることができるようになる。

Fig.2 に製作したバネを用いた自重補償機構の写真を示す。本装置では補償重量を 60kg に設定し、横方向に配置するバネはバネ係数 40N/mm のバネを車椅子両側面にそれぞれ4本ずつ計8本、縦方向に配置するバネも同じく車椅子両側面にバネ定数 0.43N/mm のバネを2本ずつ計4本配置した。自重補償機構は Fig.1 の形をしたユニットになっており、この底面を市販の車椅子下部フレームにアタッチメントを介して圧着することにより本装置は製作されている。このように装置を構成したことで、特別な溶接加工が不要になり、製作費を安価に抑えることに成功している。

また本装置ではできるだけ軽量・コンパクト・安価に装置を構成するため、中央部のリンクの屈曲方向が逆転するのを防止する機構は特に配置せず、その代わりにストッパーを用いて天板の可動域に上限を設けることでリンクが特異姿勢になることを防いでいる。



Fig. 2 Prototype of wheel chair with spring based mechanical gravity compensation system

本装置が自重補償装置として機能することを確認するため、先端に力センサを取り付けたロボットを用いて車椅子天板を一定速度で押し下げた時に、ロボット先端に生じる反力を計測することで、生成される自重補償力を計測した。

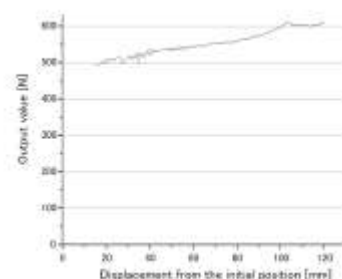


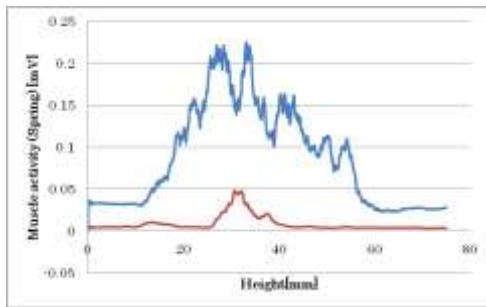
Fig. 3 Compensation force generated from spring based mechanical gravity compensation system

Fig.3 に計測結果を示す。本図に置いて横軸は座面高さ、縦軸が生成される補償力を示すが、ほぼ一定の補償力が任意の座高で生成されていることが確認される。また補償重量も設定していた 60kg と近い値が得られていることが分

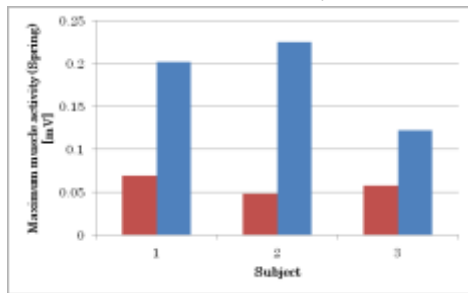
かる。

ただし、本装置では、横方向に配置するバネとワイヤの接合部が想定以上に長いスペースを必要としたため、座面を下げるにつれ、この接合部とワイヤ折り返し用のペアリング間に干渉が発生し、バネが余計に引張られることで、Fig.3に見られるような補償力の上昇を招いてしまうという欠点を持つ。バネとワイヤの接合法に関しては今後の課題である。

次に本装置の有効性を検証するため、3名の被検者を用いた官能試験を行った。実験では車椅子に座った状態から、両側の肘掛けを持って15cmほど体を持ち上げるタスクを課し、タスク中に発生する筋電を測定することにより、患者にかかる負担がいかにか軽減されるかを調べた。本タスクにおいて最も活動する筋肉は上腕三頭筋であると考えられるため、測定においては上腕三頭筋起始部に表面筋電計を装着して、持ち上げタスク中の筋活動を測定した。Fig.4(a)に被検者一人の筋電計測結果（筋活動のRMS値）を、Fig.4(b)に全被検者における最大筋活動度の変化を示す。図中赤線が、自重補償付き車椅子を使用した場合の筋活動を青線が自重補償なしの車椅子を使用した場合の筋活動をそれぞれ表す。図から明らかなように、本装置により、筋活動を1/2~1/4に緩和することが可能であることが確認される。



(a) muscle activity



(b) peak value of muscle activity

Fig. 4 Muscle activity in seat elevation task

3. ゴムを駆動力とした自重補償機能付き車椅子

2章ではFig.1のような機械式自重補償機構を用いて自重補償付き車椅子を構成したが、バネを用いた自重補償機構はバネの線径分の厚みが必要になるため、その分装置が厚くなり、鉄の比重の大きさから、装置重量も大きくなってしまいう問題がある。在宅で使用する車椅子では、収納時に折りたたむことができ、段差乗り越えや収納の際の介護者の負担を軽減するため、軽量であることが望まれる。そこで、本章では、バネの代わりにゴムを用いて駆動力を生成することで、2章で構成した自重補償付き車椅子をさらに軽量化・薄型化することを考える。Fig.5にゴムを用いた機械式自重補償機構の概略図を示す。

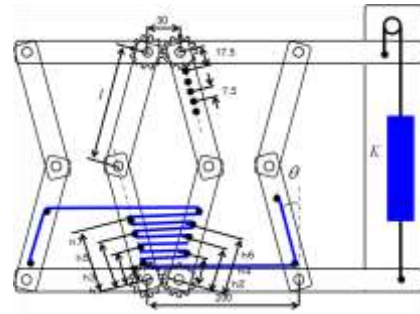


Fig. 5 Rubber based mechanical gravity compensation system

本装置ではFig.1と同様にフリージョイントを介して、ギヤを固着させた4本のリンクを上下の板に枢着するとともに、その外側にフリージョイントを介してさらに4本のリンクを内側のリンクと左右逆向きになるように上下の板に枢着した構造になっている。それぞれのリンク間には図のように、一本のゴムが地面と平行に伸張するように折り返して張られており、それぞれの折り返し点にはゴムが一樣に伸張可能なように小型のペアリングが配置されている。

また縦方向に配置するゴムは座面の下降によって引き延ばされるように、支柱上部に配置したプーリを介して天板に接続されている。

本装置の天板を押し下げると、2章の装置と同様にギヤを固着させた内側のリンクがひし形に変形する。すると外側のリンクはパラレルリンク構造により内側のリンクと平行に屈曲し、Fig.5のような形状になる。このとき、リンクの鉛直方向からの傾斜角を θ 、各ゴム折り返し点のギヤからの距離を h_i とすると、ゴムの伸張量は

$$2 \left(\sum_{i=1}^7 h_i \right) \sin \theta \quad (6)$$

で与えられることになる。従って、横方向のゴムを上段にも張った系全体が持つ全ポテンシャルエネルギーは、横方向に配置したゴムのヤング率を K_1 、縦方向に配置したゴムのヤング率を K_2 、リンク長を L とすると、(3)式と同様に、

$$U = 4K_1 \left(\sum_{i=1}^7 h_i \right)^2 \sin^2 \theta + 4K_2 L^2 \cos^2 \theta + 4K_2 L^2 (1 - 2 \cos \theta) + 2MgL(\cos \theta - 1) \quad (7)$$

で表わされる。

従って、それぞれのゴムのヤング率を

$$K_1 = \frac{MgL}{4 \left(\sum_{i=1}^7 h_i \right)^2}, \quad K_2 = \frac{Mg}{4L} \quad (8)$$

を満たす時、

$$U = 0 \quad (9)$$

となって、任意の座高で自重補償が実現されることになる。

Fig.6に試作した自重補償機構付き車椅子の写真を示す。Fig.5の装置に比べると構造が簡素化され、装置の幅も大幅に薄くなっていることが分かる。

本装置では患者の体重の一部(35kg)を補償することを目指して、(8)式からゴムのヤング率を求めた。このヤング率の値とゴムの弾性限界における伸張量が(6)式から求められる最大ゴム伸張量を超えないようにゴムの材質を選定した。その結果、今回はシリコンゴムφ5mmを用いて、装置を構成した。また、縦方向のゴムにはアメゴムを用い、微妙なヤング率の調整はゴムの幅を調節することで行った。



Fig. 6 Prototype of wheel chair with spring based mechanical gravity compensation system

本装置が自重補償装置として機能することを確認するため、2章と同様に、先端に力センサを取り付けたロボットを用いて車椅子天板を一定速度で押し下げた時に、ロボット先端に生じる反力を計測することで、生成される自重補償力を計測した。

Fig.7に計測結果を示す。横軸は座面高さ、縦軸が生成される補償力を示すが、ほぼ35kgの補償力が任意の座高で生成されていることが確認される。ただし、ゴムを使用した自重補償装置においても、座面を下げるにつれて補償力の上昇が生じるという問題がある。これは座面を下げるにつれて、リンク上に配置したベアリングにかかる荷重が増大することで摩擦が生じ、ゴムの伸長量にばらつきが生じることに起因する。この摩擦の問題に関しては、ベアリングの耐荷重を上げることで対応できると考えられるが、一方で装置が厚く、重くなるというデメリットもあるため、慎重な対処が必要であり、今後の課題である。

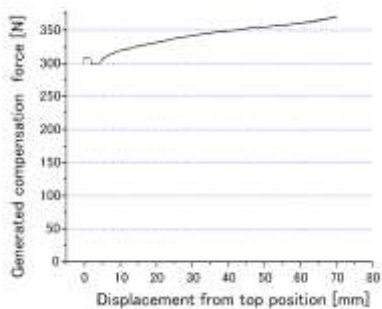


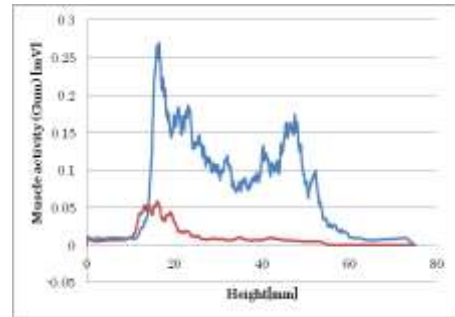
Fig. 7 Compensation force generated from rubber based mechanical gravity compensation system

次に本装置の有効性を検証するため、2章と同様に3名の被検者による官能試験を行った。Fig.8(a)に被検者一人の筋電計測結果（筋活動のRMS値）を、Fig.8(b)に全被検者における最大筋活動度の変化を示す。図中赤線が、自重補償付き車椅子を使用した場合の筋活動を青線が自重補償なしの車椅子を使用した場合の筋活動をそれぞれ表すが、図から明らかなように、35kgの自重補償においても筋活動を2/3~1/4程度に緩和する効果があることが確認される。

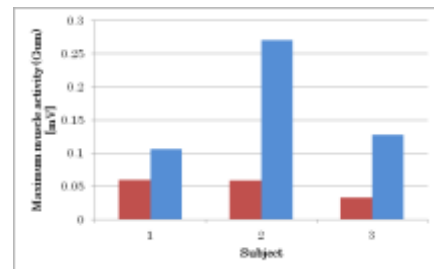
4. 結言

本研究では、移乗を容易にする機械式自重補償機能付き車椅子の開発を行った。まず、駆動力としてバネの復元力を用いた自重補償機構を開発し、それを市販の車椅子に搭載することで機械式自重補償機能付き車椅子の試作機を開発した。そして、力センサを用いた性能評価により、任意の座高でほぼ正確な自重補償が実現されることを確認するとともに、筋電計測により、移乗動作時に患者にかかる負

担を1/2~1/4に軽減する効果があることを確認した。次に、さらなる装置の軽量化、薄型化を図るために、弾性体としてゴムを用いた自重補償機構を考案し、これを搭載した軽量の自重補償機能付き車椅子の試作機を製作した。これに対しても、力センサを用いた性能評価によりほぼ正確に自重補償が実現できていることを確認するとともに、筋電計測により、移乗動作時に患者にかかる負担を2/3~1/4に軽減する効果があることが確認された。



(a) muscle activity



(b) peak value of muscle activity

Fig. 8 Muscle activity in seat elevation task

参考文献

- (1) 森田寿郎, 自重補償機構の設計原理と動作支援技術へ応用, バイオメカニズム学会誌, vol. 30, no.4, pp. 200-204, 2006.
- (2) J. L. Herder, Development of a Statically Balanced Arm Support: ARMON, Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005.
- (3) S. K. Banala, S. K. Agrawal, A. Fattah, V. Krishnamoorthy, W. Hsu, J. Scholz, and K. Rudolph, Gravity-Balancing Leg Orthosis and Its Performance Evaluation, IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 6, pp. 1228-1239, 2006.
- (4) 中山学之, 荒木洋輔, 杉本幸夫, 藤本英雄, 腱機構を用いた機械式下肢パワーアシスト装置, バイオメカニズム学会誌, vol.20, pp.111-121, 2010.
- (5) 遠藤玄, 山田浩也, 矢島明, 尾形勝, 広瀬茂男, 非円形プーリーバネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適用, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.1, pp.77-84, 2010.
- (6) 武居直行, 池松貴史, 村山英之, 藤本英雄, 回転カム・ばねを用いた重力補償機構の設計・開発, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2009) 論文集, 3J1-4, 2009.
- (7) 中川紀壽, 奥野太郎, 関口泰久 “等反発力ばねモデルの特性向上に関する研究, 日本機械学会論文集(C), vol.74, no.739, pp. 536-541, 2008.