

## 路面凹凸を乗り越える歩行支援機の開発

## Development of Outdoor Walking Aid

○ 石濱 正男(神奈川工科大) 有竹 貴司(ジャトコ) 宮崎 達也(本田技術研究所)

Masao ISHIHAMA, Kanagawa Institute of Technology  
Takashi Aritake, Jatco Co.,Ltd.  
Tatsuya Miyazaki, Honda R&D Co., Ltd.

**Abstract:** Walking aid is an automobile with wheels and an engine that can carry a major part of its user's weight. Therefore, automotive engineering was applied to improve walking aid design in this study. The walking aid developed can turn in a small space such as in an elevator car, ride over gaps as curb stones, and keep straight traces without its user's effort on rough and slanted surfaces. The core part of this design lies in adoption of multi-functional swing-arm suspension for front caster wheels and direct yaw moment control by rear wheel motor drives.

**Key Words:** welfare engineering, suspension system, vehicle dynamics, walking aid, yaw control

## 1. はじめに

歩行に若干の障害がある方々が、豊かな生活をするには、近所へ歩行をすることが望まれる。しかし、従来の歩行支援機は凹凸や傾斜のある屋外路面を小さな力で乗り越えることが困難であった。そこで、軽量でしっかりとした支持感、という基本的な機能を持った歩行支援機を設計する基礎技術の開発を試みた。

核となる技術の第一は、段差に当たったときに、歩行支援機が保持していた運動エネルギーを、ポテンシャルエネルギーとして一旦蓄え、それを段差よりも滑らかな軌跡で運動できる前輪に与える前輪サスペンション機構である。第二は、横方向の傾斜や段差への斜め衝突という場面でも歩行支援機が望みの方向を保つ、左右駆動輪の Direct Yaw Moment Control (以下 DYC) である。

## 2. 必要な機能と仕様の検討

## 2-1 使用条件の特定

歩行に支障はあるものの、体重は静的には自ら支えることができ、歩行に際しては体重の30%を支援機に預けるといふ条件を設定した。また、典型的な郊外の歩行路面を実地調査した結果、主要な障害物は、排水用グリッド、小枝、歩車道間の段差であった。(図1) これら障害物の出現頻度95%に対応できることを必要仕様とした。例えば、段差高50mmという歩車道間段差であり、路面勾配最大値は8%でわが国の道路設計基準とも合致する。

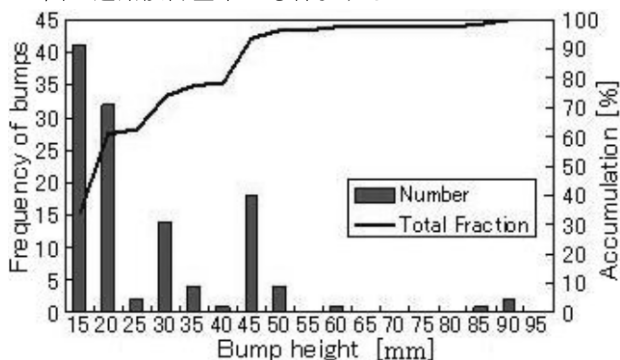


Fig. 1 Bump height frequency distribution.

## 2-2 設計仕様

上記の使用条件とわが国の法規や標準を考慮し、設計仕様を決めた。(表1) なお、表には記述していない条件とし

て、旋回中心が使用者の足元に近いことがある。これを満たすため、後輪操舵は設計案から除外した。

Table 1 Specifications of the prototype design

Item	Unit	Description
Dimension(LxWxH)	mm	900 x600 x 650*
Weight	kg	<20 kg
Wheel base	mm	500
Mass	ratio	50: 50
Maximum gap height to climb	mm	50
Grip height range	mm	600 - 1000
Vibration isolation from ground to grips	dB	10
Turning radius		On-spot turning
Braking system		Electric motor reverse torque
Human-machine interface		Push pressure sensors on L/R grips
		*Grip at minimum

## 3. シャシとフレームの設計

## 3-1 多機能前輪サスペンションの設計

50mm程の段差を乗り越すために、前輪用に多機能のスイングアーム式サスペンションを設計した。(1) (図2) 前輪はV型リンクの前端にある誘導輪と、後端にある荷重支持用主輪の二種を持ち、V型リンクはその頂点にあるピボットまわりに揺動できる。支援機が車道から歩道に上るとき、主輪が縁石側面に当たってV型リンクが揺動を始める。次に誘導輪が歩道面に接しつつ支援機前部の荷重を支える。V型リンクの揺動に対する復元力を与えるねじりばねにポテンシャルエネルギーが徐々に蓄積され、それがある限度に達した時に、主輪を持ち上げる作用にそのエネルギーが使われる。また、上記のV型リンクとともに上昇する主輪の軌跡は、段差断面の幾何学的形状に比較して遥かに緩い上昇率となる。(図3) これは陸上競技の棒高跳びの原理に近い。

このねじりばねは、主輪の段差乗り上げを支援するだけでなく、縁石側面に衝突した衝撃が使用者の手に伝わることを減らす効果も持つ。さらに、V型リンクの揺動角を計れば使用者が支援機を押す力を知ることができ、その情報を駆動輪で出すべき推力の制御に使うことができる。これらが「多機能」サスペンションの原理である。

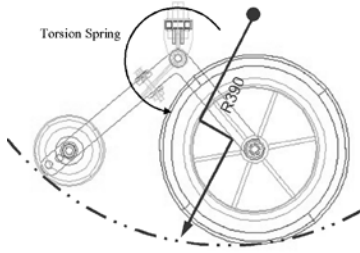


Fig.2 Front wheel suspension mechanism with a V-shaped arm

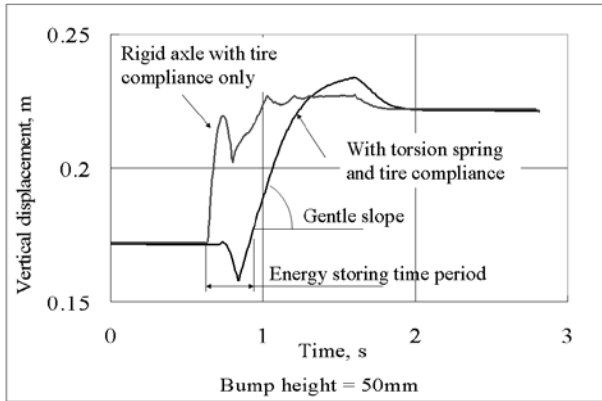


Fig.3 Effective slope reduction by front suspension swaying motion with torsion spring

3-2 トポロジー最適化によるフレームの軽量設計

扱いやすい支援機実現のため、軽量化にはトポロジー最適化をまず実施し、そこから形状最適化を行った。これを実現するソフトウェアには Optishape を用いた。

まず、使用者と支援機の外側寸法の制約条件により構成される空間を、Voxel モデルで完全に満たす。このモデルに荷重条件と拘束条件を与え、トポロジー最適化を行うと図4のような Voxel がフレームの存在空間として残る。ここから実用上の制約などを考慮して形状最適化を行い、さらに製造上の要件を加えて詳細設計を行い、試作品を製作した。(図5)

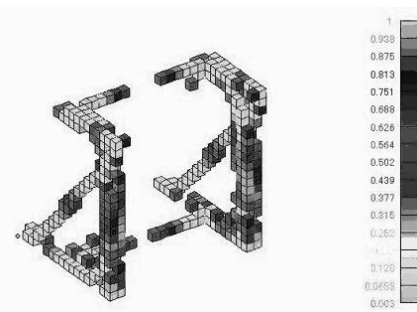


Fig.4 Topologically optimized voxel type finite element model

段差を登るときには主として前輪への衝撃入力を使用者の手腕に影響を及ぼすが、段差を降りるときには後輪からの衝撃入力の影響が大きい。そこで後輪サスペンションをトレーリングアーム形式とした。これらの衝撃緩和設計の目標となるグリップの振動目標は略  $2.5\text{m/s}^2$  とした。これは事前にグリップ部分の模型を作って電磁加振機に取り付け、パネリストによる主観的評価実験で得た値である。

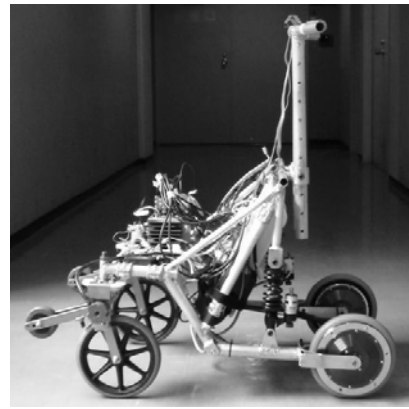


Fig.5 Photo of the prototype

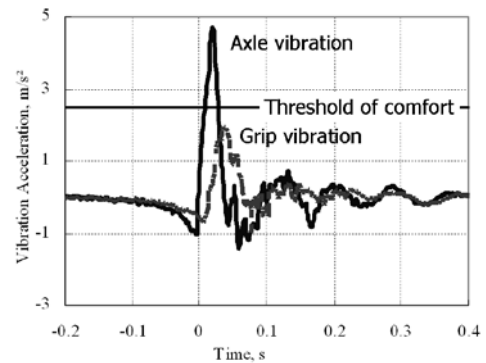


Fig.6 Grip vibration reduction in falling down a gap of 50mm

4. 駆動系とその制御

4-1 インホイールモータの仕様と性能

シャシとフレームから残ったスペースと必要とされる推力を推定し、表2に示す仕様のブラシレス直流モーターを採用した。形状は図5に、性能は図7に示す。

Table 2 Parametric design of DC brushless driving motor

Parameter	Symbol/Unit	Value
Number of poles	$P$	8
Number of slots	$qs$	6
Magnet inner diameter	$D_i, \text{mm}$	150
Magnet length	$L_h, \text{mm}$	30
Magnet thickness	$L_m, \text{mm}$	10
Outer diameter of rotor yoke	$D_a, \text{mm}$	148
Armature core outer diameter	$D_b, \text{mm}$	137
Armature core inner diameter	$D_d, \text{mm}$	45
Armature core length	$L_a, \text{mm}$	25
Air gap	$d_g, \text{mm}$	1

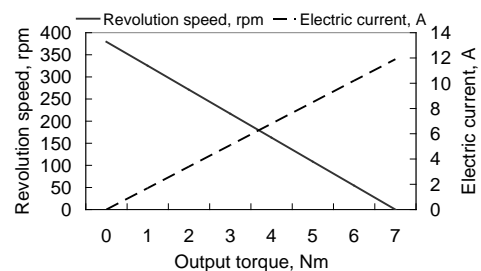


Fig.7 Designed performance of the motor

4-2 略直進走行時の駆動制御

駆動系の制御は、支援機速度を指令し、フィードバック制御する方式とした。使用者が支援機を前方に押す力を左右グリップに設けたフィルム型圧力センサーからの独立した信号として使う。左右の力の合計を支援機の走行速度指令とし、力の差を旋回率指令信号として扱う。(図 8, 9) 路面凹凸などの外乱による速度と旋回率の攪乱は、フレームに取り付けたヨーレートセンサーと前輪揺動角センサー(ポテンシオメータ)により検知し、モーター制御電流を加減する。これらの制御の妥当性は Matlab/SIMULINK を使って事前に確認し、そのアルゴリズムを LabView のインターフェイス CompactRIO に移して実働させた。

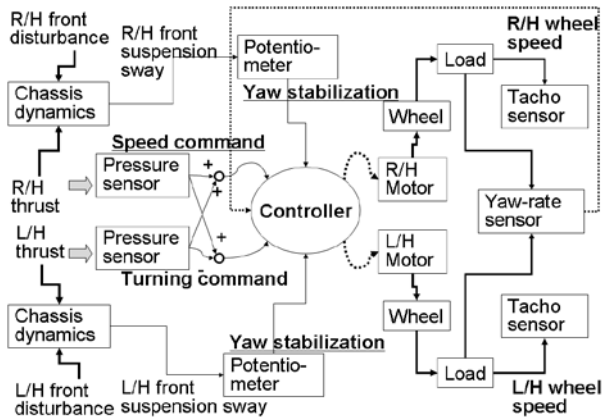


Fig.8 Motor control block diagram

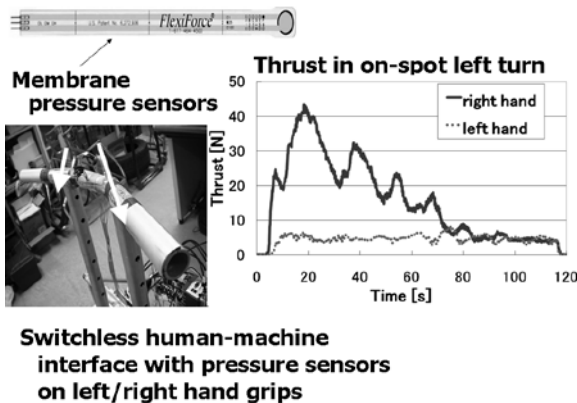


Fig.9 Human-machine interface on the grips and the thrust for on-spot turning

4-3 ヒューマンインタフェイスの設計

体重の30%程度をグリップで支える支援機の利用者に信頼される支持構造であるために、自転車のハンドルのように動く構造を避け、固定したグリップに圧力センサーを埋め込んで前後進と旋回の指令を受け取る。

しかし、人間は急制動をしたい緊急事態に遭遇した時に、グリップを強く握り続けることが、パネリストによるテストで確認された。そこで、上記の圧力センサーからの信号システムには強い信号が一定時間以上継続した時にはブレーキがかかるような処理を組み込んだ。使用しているブラシレス直流モーターは、車輪側から駆動されると発電機として働くので、電力回路に抵抗を入れて接続状態にすると、制動制御ができる。

これらの組み合わせによって、段差乗り上げ時に使用者がグリップを押す力は、モーターを使わないときと比較し

て、小さく保って許容範囲に収まることが、試験走行の結果確認された。(図 10)

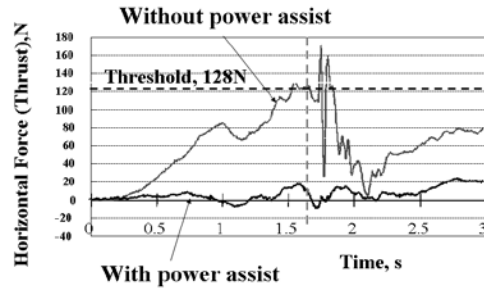


Fig.10 Effect of power assists in climbing a 50mm bump

4-4 左右方向に傾斜するカント路面上のヨー運動制御

キャスター式の前輪は、その場旋回や転舵機構の不利用という利点があるが、弱点もある。それは、カントのある路面で使用者の意思とは関係なく、前輪が傾斜を下る側に向いてしまい、支援機がカントを下る方向に旋回していくことである。これを防ぐ余計な努力を使用者にさせないようにする制御のシミュレーション検討を、マルチボディダイナミクスモデルを使って実施した。(図 11, 12)

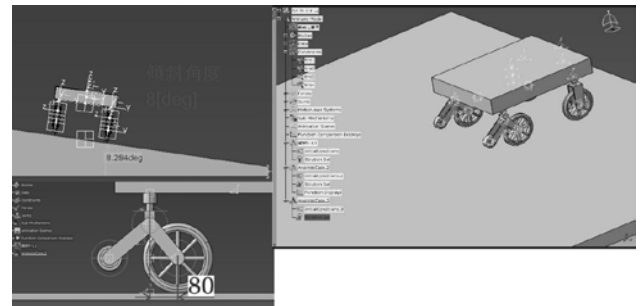


Fig.11 Multi-body dynamics model for driving on cant

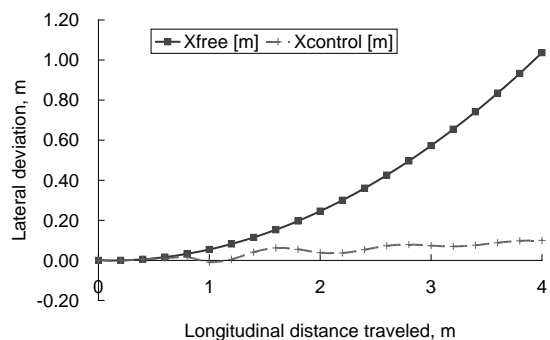


Fig.12 Effect on lateral trace deviation on cant (simulation)

図 12 の縦軸が直進経路からの逸脱量である。“Xcontrol”で示されているように、支援機フレームに装着したヨーレートセンサーを使って、支援機前部がカントで下ろうとする動きを検知し、左右車輪の速度差が消えるように駆動制御をすると直進性が向上した。

4-5 段差の斜め乗り越しでのヨー運動制御

カント路での安定走行制御は、応答速度が低くてもよく、

フィードバック信号も、ヨーレートという入力的时间積分でよかったが、路面凹凸による進行方向の急変には、これでは対応できない。そこで、左右前輪に作用する力をそれぞれ検知することとし、V型リンクの揺動角を測る。(図13)ただし、過大なヨー制御を避けるため、これらの入力信号には閾値を設け、大きな入力に対してのみDYCを作動させる。その結果、段差に衝突した直後に一旦ヨーレートが発生するが、この後に支援機のヨーレートがゼロ近辺に戻り進路の大幅な乱れ防止が確認された。(図14)なお、絶対位置を検知していないので、軌跡を元通りにすることはできないが、実用上の不具合はない。

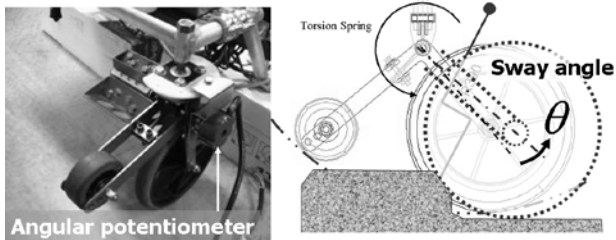


Fig.13 Detecting front wheel rolling resistance disturbance by a sway angle sensor.

5. まとめ

以上記述してきた実験結果に基づいて、本試作機の機能と性能を従来型の歩行支援機と比較した。(表3)本設計方式の良さを箇条書きにする。

- 1) 前輪キャスターと後輪左右独立駆動方式の組み合わせによって、その場旋回ができて、しかも体重支持が確実な支援機となる。
- 2) 揺動可能な前輪サスペンションと後輪モーター駆動によって、50mmの段差を使用者は最小限の操作力と手腕に加わる衝撃力で乗り越えることができる。
- 3) フレームに搭載したヨーレートセンサーや前輪サスペ

ンションの揺動角センサーを用いた左右独立駆動制御により、カント路や段差でも進行方向を安定させることができる。

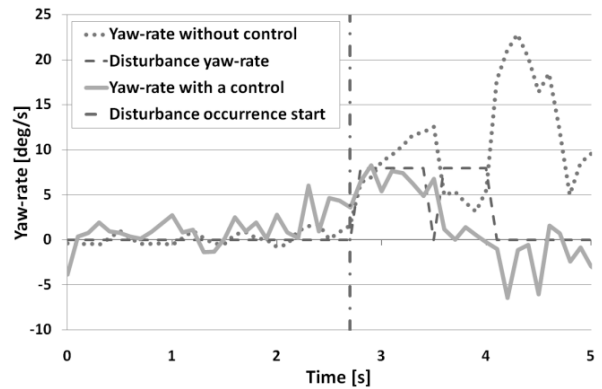


Fig.14 Effect of yaw stability control in overriding a bump

参考文献

- (1) Masao Ishihama, Takashi Aritake, Dynamical Design of an Outdoor Walking Aid, FISITA2006 Transactions, F2006D112T, 2007
- (2) Practical Motor Design Manual, Toshiba Motor Research Group, Sohgo Denshi Press, 1992
- (3) Makoto Kamachi, et.al., Improvement of Vehicle Dynamic Performance by Means of In-Wheel Electric Motors, Mitsubishi Motors Technical Review, Vol.18, p.107-113, 2006

謝辞

本研究においては、テーマ設定、資金の獲得などにおいて岡村宏 元芝浦工業大学教授のお世話になった。ここに深甚なる謝意を表します。

Table 3 Performance comparison with conventional motorized walking aids

Performances		Conventional motorized walkers		Our design	
Evaluation items	Design target	Features	Score	Features	Score
Driving on flat surfaces	Easy speed control	Motor driven rear wheels	Good	Hub-motor rear wheels	Good
Climbing	Same performance as that on a flat surface	Motor driven rear wheels	Good	Hub-motor rear wheels	Good
Braking	Automatic speed limitation	Electric braking	Good	Electric braking using a slope sensor	Good
Stability	Easy line tracabilty on rough surfacse and gaps	Front wheel steering connected to handle grips with links. Needs maneuvering skill.	Fair	Automatic direct yaw moment control with hub-motor rear wheels	Good
Turning radius	Turnable in an elevator car of width=1m	Front wheel steering connected to handle grips with links	Poor	Free casters in front wheel	Good
Running over rough terrain	Climbable 50 mm gap height	No special device for riding over gaps	Poor	Special front suspension system	Good
Ride	Shock on handle grips should be less than 1G	No special device for absorbing shocks in gap over-riding	Poor	Front & rear suspension system	Good
Size	Width< 0.6 m, Length< 1 m	Large	Fair	W x L = 0.6 x 0.9	Fair