403 凹凸路を走破する歩行支援機の動力学設計

Dynamic Design of a Walking Aid for Rough Road Surfaces

○正 石濱 正男 (神奈川工大) 学 有竹 貴司 (神奈川工大)
学 坂本 一之 (神奈川工大) 学 中越 敏弘 (神奈川工大)

Masao ISHIHAMA, Kanagawa Institute of Technology, 1030 Shimo Ogino, Atsugi-shi, Kanagawa-ken
Takashi ARITAKE, Kazuyuki SAKAMOTO, Toshihiro NAKAGOSHI, Kanagawa Institute of Technology

A prototype of walking aid for riding over gaps and rough road surfaces was developed. To ride over gaps easily, it adopted virtual large diameter wheel concept that consists of multi small diameter wheels placed on the virtual wheel circumference, in combination with soft front suspension compliance. Giving the frame high stiffness by FEM topological and parametrical optimization minimized structural vibration amplification; and, reduced the vibration transmission to human hands with minimum weight. In addition, vibration isolation mechanisms were installed at the handle linkages and at the grips. This design was, however simple, proved to be effective through objective and subjective evaluation tests.

Key Words: Dynamics, Design, Vibration, Walking Aid, Ride, Road

A1. はじめに

ちょっとした段差や不整路を乗り越えての散歩や買い物ができる、安価な歩行支援機を、本体構造や足回りの動力学の検討を多用して試作機の開発を行った。

A2. 製品の企画

A2.1 想定する使用者：軽度の歩行機能障害者や高齢者。

A2.2 主な仕様

駆動：後輪を想定

操舵：前輪キャスター式

旋回性能：0.9m 以下

段差乗り越え高：50mm

必要推進力（人）：<128N

グリップ部振動：<5m/s²

支持剛性：たわみ<10mm

実用登坂角度：10°

Fig.A1 CAD model of the walking aid prototype

A3. 軽量化のための構造最適化

A3.1 本体構造案の創出

歩行や足回りなどに必要な空間を除いた、平面図でコの字型の空間を、本体構造が使えると仮定し、均質化法有限要素モデルで満たした。最適化計算の結果、サッカーゴール状のフレーム構造が最適構造案として残った。

A3.2 フレーム構造の最適化

均質化法で得られた最適形状と等価な断面2次モーメントを有する鋼管を配置した構造を設計し、最低次の固有振動数（56.1Hz、ねじり）でも路面振動入力主要成分に対して十分高いことを確認した。

A4. 段差乗り越え機構の開発

A4.1 多輪包絡線による仮想大径前輪の設計

段差乗り上げに必要な力と前輪直径との関係を実験・計算両面で検討した。人が楽に押せ、歩行器が前倒れしないためには段差の10倍の直径が必要となる。仕様を満たすφ500の前輪は空間的制約により採用困難である。そこで多数の車輪配列の包絡線を仮想の大径輪として使う多輪包絡線概念を創出し、揺動リンクの末端に小径輪を配置して、仮想直径740mmを実現した。リンクの揺動は、予荷重を与えたねじりばねで反力を与え、通常走行中の安定と、段差乗り越え時の衝撃吸収の両作用を持たせている。

A4.2 段差乗り越え運動シミュレーション

機構解析ソフトウェアを用いて、日常生活範囲で頻度が高い50mm段差乗り越え運動の時系列解析を行い、最大荷重、加速度などを予測し、問題のないことを確認した。

Fig.A2 Animated bump override simulation

A4.3 プロトタイプによる作用力の実測

被験者が握るグリップとフレーム間に力センサーを挟み、前後と上下方向の力を計測した結果、必要推進力は170Nであった。補助駆動力として42Nを得られれば、日常生活上必要な段差の殆どを乗り越え可能であることが証明された。

Fig.A3 Measured grip forces at a 50mm bump

A4.4 ハンドルとグリップ部の防振設計

前輪の揺動リンクだけでは遮断できない上下振動は、ハンドルを揺動させてばねで吸収、前後振動はグリップのスライド機構とばねで吸収した。

A5. 実走行での第三者による感性評価

高齢者キットを着用した模擬歩行障害者14名による評価の結果、既存の歩行車よりも段差昇降性がすぐれることが確認された。しかし、乗り上げ直後の前輪サスペンションばねの反動による加速に違和感が残った。駆動補助とともに今後の課題である。

1. はじめに

「夢ある老後」の実現には、身体機能の維持・回復を通じて高齢者の社会参加促進が重要である。このためには、歩行による自立生活での上下肢の訓練が重要であり、それに役立つ歩行支援機の研究開発、実用化が課題となっている。しかし、従来型の歩行補助車は、ちょっとした段差や不整路での走行が困難である。本研究では、「段差乗越え」、「転倒防止」、「手腕への振動伝達防止」という動力学的性能を向上し、生活行動範囲の拡大を保証し得る走行性能を持つ歩行支援機の設計技術開発を行った。

2. 製品の想定と企画

2.1 生活道路走行による必要性能調査

神奈川工科大学周辺の住宅と商店街約 5km を、市販の歩行支援機を使って歩き、問題となる路面・段差調査を行った。この支援機は、前後輪ともに直径 200mm の車輪を有し、前輪がキャスターになっているもので、病院の廊下などの平坦路面での使用を前提として設計されている。調査にはビデオ収録、物差しでの段差高さ測定、歩行支援機の車軸取付け点での加速度計測などの方法を用いた。この段差高さの頻度分析結果を Fig.1 に示す。

Fig.1 The bumps distribution investigation result

段差の出現累積頻度 95%の範囲は 50mmに相当する。また、歩行安全上最も重要と考えられる横断歩道から歩道へ上るときの段差を構成する縁石がこの高さである。従って 50mm段差をクリアできれば通常の支障はなくなる。また、点字タイルやグレーチング上でフレームの弾性共振を伴う不快な振動を感じた。典型的な凹凸路での車軸振動の計測結果は約 15m/s^2 であった。以後、このデータベースを設計に用いた。

2.2 想定する使用者

運動機能が低下した高齢者、あるいは歩行機能に軽度の障害を持つ歩行障害者。

2.3 支援する歩行条件

既存歩行車の段差・不整路での進行不能状態を改善し、屋外での移動を支援する。段差や荒れた路面上の歩行を想定。

2.4 主な仕様

- (1) 重量：15kg 以下（重心高：300mm 以下）
- (2) 主要寸法：ホイールベース×トレッド×ハンドル高さ＝
500×520×800mm
- (3) 駆動方式：後 2 輪ベルト駆動（将来装着。今回の試作機には駆動装置は装着していない。）
- (4) 制動方式：手動及び ER 流体ブレーキ
- (5) 制御方式：無段階速度調整式（力、変位センサ）

(6) 実用登坂角度：10°

(7) 段差乗越え高さ：50mm

(8) 上下・前後加速度：グリップ部で 5m/s^2 以下

(9) 姿勢変化：支援時に 10mm 以下のたわみ量

(10) 操舵方式：前 2 輪キャスター式（注 1）

注 1. エレベーター内や人ごみでは、小回り（自転）が効かないと持ち上げなければならない。そこで、ほぼ自転可能である 2WS と 4WS を検討した (Table 1, Fig2)。4WS は機構が複雑になる。モーター取付けが容易な後輪固定の 2WS を採用した。

Table.1 Comparison of turning radius (2WS and 4WS)

2WD (R_{2WS}) [m]	0.82
4WD (R_{4WS}) [m]	0.53
$(R_{4WS}/R_{2WS}) \times 100$ [%]	64.5

Fig.2 Turning geometry. 2WS (left), 4WS (right)

(11) ヒューマンインターフェースの位置

既存歩行車の利用率は、女性が圧倒的に多い。機器の寸法決定には、被支援者の身長・横幅・上肢長及び下肢長、下肢機能、上肢筋力、姿勢を用いた。(Fig.3,4 参照)

Fig.3 Optimum support angle in vertical plane

Fig.4 Optimum grip height

3. 軽量化のための構造最適化

3.1 本体構造案の創出

歩行や足回りなどに必要な空間を除いた、平面図でコの字

型の空間を、本体構造が使えると仮定し、均質化法有限要素モデルで満たした。最適化を行う条件としては、まず静的な荷重を考え、下記の3条件を満足させた。計算の結果、サッカーボール状のフレーム構造が最適構造案として残った。

(Fig.5)

《最適化条件》(※)

- (1) 静止時、使用者体重の40%支援時
- (2) 前輪の障害物衝突時
- (3) 傾斜地にて使用者の体重を機器で支援

Fig.5 Strain energy distribution during topology optimization process. High strain portions were kept as structural members.

さらに Fig.5 を基に力法によるノンパラメトリック形状最適化法を用い、必要な骨格を抽出し (Fig.6), 上記の最適化条件 (※) にて形状最適化を行った (結果: Fig.7).

Fig.6 Topologically optimized model (left)

Fig.7 Shape optimized model (middle)

Fig.8 Model for realization (right)

3.2 フレーム構造の最適化

フレームが路面入力を増幅して手腕系に伝達せず、荒れた路面を快適に歩くには、まずフレームの剛性を上げて、固有振動数を高める必要がある。均質化法で得られた最適形状と等価な断面2次モーメントを有する鋼管を配置した構造を設計した。(Fig.8) 最低次の固有振動数 (56.1Hz, ねじり) でも路面振動入力主要成分に対して十分高いことを確認した。(Table 2)

Table 2 Mode shapes and natural frequencies

Number	Optimized	Conventional	Mode shape
	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	
1	56.1	16.2	Torsional vibration (Horizontal)
2	63.8	21.3	Opening and closing (Horizontal)
3	70.8	38.2	Opening and closing (Horizontal)
4	75.7	42.9	Opening and closing (Vertical)

4. 段差乗り越え機構の開発

4.1 多輪包絡線による仮想大径前輪の設計

段差乗り越えに必要な力と前輪直径との関係、準静的な運動を行うとして計算で検討した。(Fig.9)

Fig.9 Required amount of forces to override a 50mm bump

この計算による傾向を基礎として、タイヤの変形や軸受けの影響を含めた供試品 (Fig.10, 11) を用いて実験を行ったところ、人が楽に押せ、歩行器が前倒れないためには段差の10倍の直径が必要となることがわかった。(Table 3)

Fig.10 Solid tires

Fig.11 Pneumatic tires

Table3 Permissible bump height of each tires

No.	Specification	Bumps height [mm]				
		5	10	15	20	25
1	φ200 solid tire	○	○	○	○	×
2	φ150 solid tire	○	○	×	×	×
3	φ100 solid tire	○	×	×	×	×
4	φ75 solid tire	○	×	×	×	×
5	φ200 pneumatic tire	○	○	○	○	×
6	φ165 pneumatic tire	○	○	○	×	×
7	φ150 pneumatic tire	○	○	○	×	×

仕様を満たすφ500の前輪は空間的制約により採用困難である。そこで多数の車輪配列の包絡線を仮想の大径輪として使う多輪包絡線概念を創出し、揺動リンクの末端に小径輪を配置して、仮想直径740mmを実現した。(Table 4, Fig.12, Fig.13) リンクの揺動は、予荷重を与えたねじりばねで反力を与え、通常走行中の安定と、段差乗り越え時の衝撃吸収の両作用を持たせている。

Table 4 The main parts of link mechanism

Parts list	Specification
Caster for bearing	Single row bearing (6000ZZ)
Front small wheel for induction	φ75 solid tire
Front normal wheel for running	φ200 pneumatic tire
Mechanism for link parts	Torsion spring (0.7N·m/deg)
Connecting with frame	M10×P1.5×30mm Bolt
Material for link parts	Aluminum (Al-6062)
Bracket	Steel (SS400)

Fig.12 CAD model of front wheel link mechanism

Figure 10 is a graph showing the relationship between Moment [N·m] (Counter clockwise : +) and Horizontal force [N]. The graph is divided into three regions: Instability (top), Borderline (middle), and Stability (bottom). Two lines are plotted: one around the O point (top line) and one around the B point (bottom line). The O point line starts at approximately (60, -5) and ends at (190, 50). The B point line starts at approximately (60, -50) and ends at (260, 10).

Fig.20 Grip and built-in spring for vibration isolation

これらの防振機構の性能を段差昇降実験にて測定した結果、各周波数帯の振動レベルが、目標値（125Hzのみ許容値）内に収まる事を確認した（Fig.21）。図中、上側の折れ線グラフは手に加わる振動加速度の許容最大振幅、下側はその理想値である。

5. 被験者による総合感性評価

5.1 実験方法

第三者に段差昇降性や振動吸収性などの比較・評価をして頂いた。評価項目を以下に示す。

- (1) Oscillation performance（振動の感じ易さ）
- (2) Override bumps（段差の乗越え易さ）
- (3) Turning behavior（曲がり易さ）
- (4) Running through performance（凸凹路面の走り易さ）
- (5) Overall performance（総合評価）

・評価対象者： 20代前半の学生14名、歩行障害者を模擬するために、高齢者キットを装着。（Fig.22）

・供試歩行支援機：

A：従来品（コスモネティ社製）

B：開発品。前輪リンク式サスペンション付、NW-1型。ハンドルサスペンションとグリップばねは無い状態。（Fig.23）

5.2 評価の結果

前輪に段差乗越え用揺動リンクを用いた開発品の段差昇降性は、既存歩行車よりも優れる結果を得た。振動特性について従来品と同じ評価しか得られていないのは、ハンドルとグリップ分の防振構造を除いて実験をしたためである。しかし、乗上げた時に一旦トーションバネにエネルギーが蓄積され、

その後に反動で前に勢い良く動くことが難点と評価された。

Fig.22 A subject with a senior citizen kit (left)

Fig.23 Walking aid with the developed front wheel mechanism

6. 結論

段差乗越えを容易にする安価な歩行支援機の動力学的設計を行い、試作・実験をした結果、駆動制御を除くパッシブ系について所定の機能・性能を有するものを開発することができた。

多輪包絡線による仮想大径輪という設計概念を創出し、小径タイヤ2輪及びリンク機構を組み合わせる事でコンパクトに具現化し、目標値として定めた50mm段差を乗越える事を実証した。

7. 参考文献

- (1) 宗安準一郎，路面傾斜角度を考慮したアシスト歩行支援機の開発，平成16年度芝浦工業大学修士論文
- (2) 新エネルギー産業開発総合機構報告書，高齢者生活作業支援システム株式会社日立製作所・機械研究所実施，
- (3) 彦根貴司，歩行支援機の動力学的設計，平成16年度神奈川工科大学大学院修士論文

Fig.21 Measured vibration acceleration amplitudes in back and forth direction (left) and vertical direction (right).

Fig.24 Result of subjective evaluations