

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	日常生活支援のための実用的ロボティックフォロワの研究-第4報：菱形4輪車両用懸架機構の提案と最適化-
Title	
著者(和文)	遠藤玄, 谷篤, 広瀬茂男, 福島E. 文彦, 入部正継, 田窪敏夫
Authors	Gen Endo, Atsushi Tani, SHIGEO HIROSE, EDUARDO FUMIHIKO FUKUSHIMA, Masatsugu Iribe, Toshio Takubo
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , , 1H2-5
Citation(English)	, , , 1H2-5
発行日 / Pub. date	2011, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2011 The Robotics Society of Japan.

日常生活支援のための実用的ロボティックフォロワの研究

-第4報：菱形4輪車両用懸架機構の提案と最適化-

遠藤玄(東工大院) 谷篤(ソニー(株)) 広瀬茂男(東工大院)
福島 E. 文彦(東工大院) 入部正継(阪電通大) 田窪敏夫(女子医大)

1. はじめに

本研究は屋外環境で人に追従し荷物を搬送することのできる実用的な移動体を開発することを目的とする。アプリケーションの一例として外出時に酸素ポンペを携帯しなければならない在宅酸素療法患者の支援を想定し、より具体的なユースケースとして「近所のコンビニエンスストアまで買い物に行く」こと(図1)を考え、車道-歩道間の段差を踏破できる小型低コストの追従型搬送移動体の開発を目指し検討してきた。現在までに目標仕様の設定やその実現性の確認 [1], 切り下げのある場合の歩道段差 50[mm] の踏破やテザーを用いた大学構内での長距離追従走行試験を行ってきた [2].

ところで同じ歩道環境の移動を想定したシニアカーや電動車椅子の仕様(例えば [3])を見ると多くの場合最大踏破段差高さは 80[mm] 程度となっている。国内の歩道-車道間の分離に一般的に用いられている縁石は高さ 90[mm], 角の R は 15[mm] 程度であることから設定された値と思われる。よって 80[mm] の段差踏破ができれば歩道環境走破には十分な性能であると考えられる。

本報告ではシニアカーに比して半分程度の全長と小型である従来試作機を基に、車輪懸架機構を改善しリンク長などを最適化することで、懸架機構の簡素化・高剛性化を行うとともに 80[mm] の段差踏破を達成する。

2. 菱形四輪車両の懸架機構

本体の中央左右に二つの能動車輪, 前後に受動キャストを装備した差動2輪駆動型の移動体は簡素な構成で低コストに製作でき, 制御も容易であることから, 研究用移動台車として幅広く用いられている(例えば [4]). しかしながらそれらの段差踏破性は決して高くない。

そこで本研究では高い不整地踏破性の実現を目指して研究開発が行われている惑星探査車両の車輪懸架機構に着目した。図2は筆者らの研究グループが開発した火星探査ローバの試作機“飛燕II号機”である。飛燕II号機は4つの能動車輪を前1輪・中2輪・後1輪の菱



図1 提案する車両の具体的なユースケース

形3列に配置し, 6輪駆動同様の高い走破性をより少ない4輪で実現することができる。また前と左, 後と右をそれぞれ平行リンク機構で構成されるボギーリンクで懸架し, さらにリンク回転角度が前後対称になるように差動機構により連結されている(図3(a))。これにより前後輪が上昇すると中輪は下降し, 車体重量を4輪に常に均等に配分することができる [5].

本研究では簡素化・低コスト化のため左右中輪のみ能動車輪とし, 前後輪は一般的な首振り受動車輪としている。また前輪が受動車輪であり駆動力を生成できないことから, 段差踏破時に前輪が押し上げられるように前輪ではボギーリンクに初期オフセット角度を導入した [2] (図3(b))。しかしながらボギーリンクが片持ち構造であったため構造的に堅牢ではなかった。

そこで図3(c)に示すように前輪と左右中輪を懸架する両持ち構造のボギーリンク機構を考える。図3(b)の場合と各車輪のボディに対する相対運動は全く同一ではないが, ほぼ同様の動きを示し, 実際後述する動力学シミュレータでの検証によってその段差踏破性にほとんど差がないことを確かめることができた。

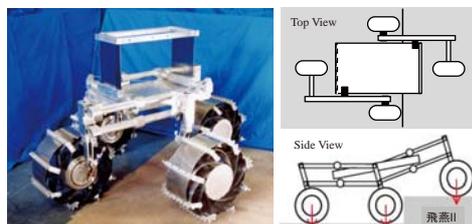


図2 火星探査ローバ“飛燕II号機”

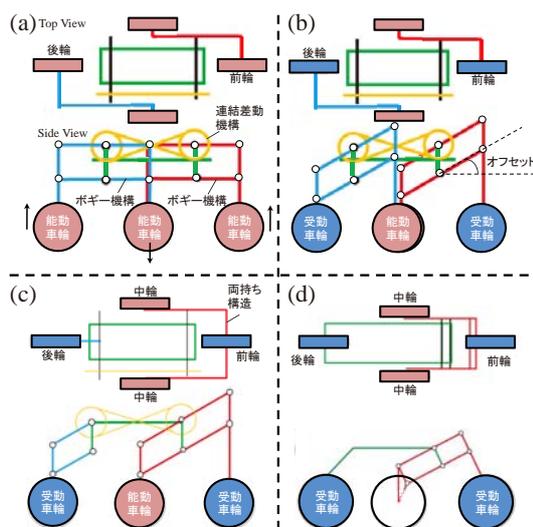


図3 ボギーリンク構造の改良: (a) 飛燕II号機, (b) 初期リンク角度の導入, (c) 両持ち構造の導入, (d) 後輪のボディへの取り付け(本提案)

さらに機構を単純化するために後輪リンク機構および連結差動機構について考察する。ボディを絶対空間に固定しこれを基準として前後輪と中輪の位置関係を考えると、後輪も前輪と対称に運動することが必要に思える。しかしながら前後輪と中輪の相対運動のみに着目すれば、後輪はボディと直接連結されていてボディとともに傾斜した場合とほとんど変わらない。厳密にはボギーリンクの運動やボディの傾斜によって重心位置が変動するが、これらはボギーリンクの支点位置や初期オフセット角度を適切に設計することで対応できる。よって本報告では堅牢性も増し連結差動機構を省いてさらに簡潔にできる図3(d)の構造を提案し採用する。

3. ボギーリンク機構の静力学解析

本節では前輪（または中輪）の段差踏破時に必要な中輪の駆動力 F が、ボギーリンクの長さや支点位置、初期オフセット角度に応じてどのように変化するか2次元平面問題として静力学解析を行った。

記号を図4のように定める。中輪は常に前後輪のホイールベース W の半分の位置にあるとし、車輪径は同一とする。 α, ζ はホイールベースや車輪径、段差高さによって幾何学的に定まる角度である。前輪踏破時に段差から受ける反力はもっとも厳しい条件である水平方向と仮定する。

各リンクごとに力とモーメントの釣り合いの式を立て、それらを解くことで前輪踏破の条件式(1)、中輪踏破の条件式(2)を得る。

$$F > \frac{G_1 + \frac{L_4}{L_3 + L_4}(G_2 + G_4)}{\tan \phi_1} \quad (1)$$

$$F > G_3 \cos \alpha + \frac{(G_2 + G_4)L_3}{L_3 + L_4} \frac{\cos(\phi_1 + \zeta)}{\cos(\phi_1 + \alpha + \zeta)} \quad (2)$$

式(1)(2)より $L_3/L_4, \phi_1$ が大きければ前輪踏破時に必要な駆動力 F が小さくなるがその一方で、中輪踏破時に必要な駆動力 F が大きくなる。よってリンクパラメータの調整による前輪と中輪の踏破性向上はトレードオフの関係にあることが示唆される。

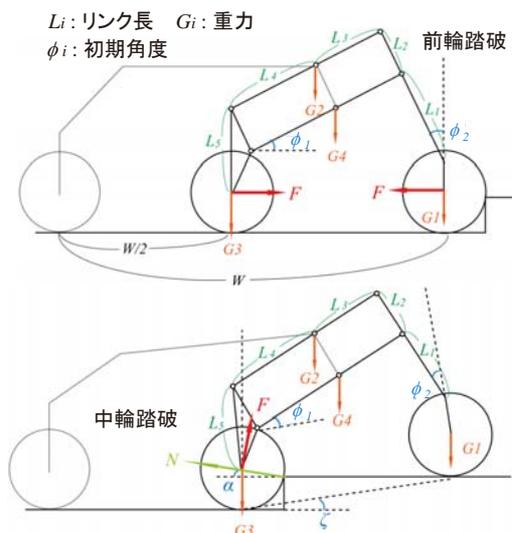


図4 静力学解析: 前輪踏破(上段), 中輪踏破(下段)

4. 動力学シミュレータによるリンクパラメータの最適化

本節では動力学シミュレータ“Open Dynamics Engine (ODE)”[6]を用いてリンクパラメータ L_3/L_4 と ϕ_1 を数値的に最適化する。最適化のための評価基準は(1)各車輪が段差踏破する際の必要中輪推進力 F の最大値の均一化、(2)踏破可能段差高さの最大化(車輪半径の80%以上)である。図5はシミュレーションに用いた車両モデルである。大きさや質量などは従来の試作と3DCADモデルに基づき現実的な値を設定している。なお本体総質量 M はペイロードである酸素ポンプやその付属品質量も含んでいる。

車輪と走行面の摩擦係数を0.7と設定し、中輪を速度制御することによって0.8[m/s]の速さで高さ0.5rの段差に進入する際の必要中輪推進力 F の最大値を計測した。(0.2 ≤ L_3/L_4 ≤ 1.6), (10 ≤ ϕ_1 ≤ 50)[deg]の範囲で網羅的にシミュレーションを行った。一例として図6左にシミュレーションの様子を、右に $\phi_1 = 40$ [deg]のときの正規化推進力 F/Mg (ただし g は重力加速度) と L_3/L_4 の関係を示す。静力学解析の結果式(1)(2)で予想された通り、 L_3/L_4 が大きくなると前輪踏破は容易になるが反対に中輪踏破が困難になる様子が分かる。

踏破可能な段差を最大化し、かつ各車輪が乗り越える際の F の最大値の変動が20%以内に収まるリンクパラメータを求めた結果、 $L_3/L_4 = 0.8, \phi_1 = 40$ [deg]の値を得た。この時、踏破可能な最大段差高さは0.9rであった。実際に構成したボギーリンク機構を図7に示す。前後輪のホイールベースが500[mm]であることから、設計上の踏破可能最大段差高さは90[mm]である。

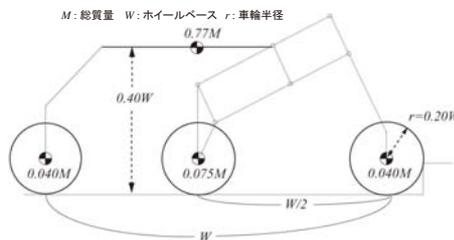


図5 車両の幾何モデルと質量分布

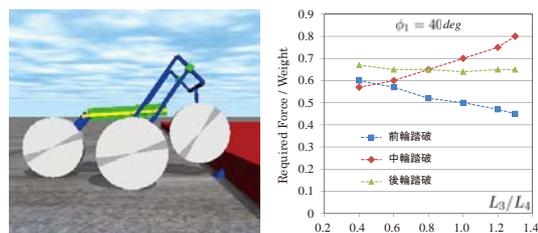


図6 ODEによる段差踏破シミュレーション例(左図)と必要中輪駆動力(右図)

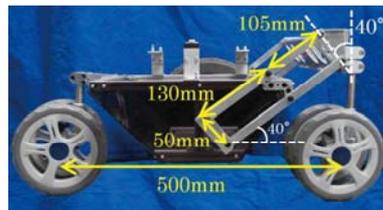


図7 試作したボギーリンク機構(リンク機構を示すため中輪は装備していない)

5. 第四次試作機の構成

第四次試作機の概観を図8に示す。今までの解析ではすべての車輪径を同じとしてリンク機構を検討してきたが、実機では酸素ポンプと付属機器のための積載スペースを確保するため、前後輪はより小さな車輪径とした。この場合であっても踏破可能な最大段差高さにはほとんど影響を与えない。なぜなら、駆動力は中輪のみで生成され、また前後輪の踏破は主にボギーリンク機構の効果によって達成されているからである。

中輪は先に提案した低コスト大径偏平能動車輪 [7] を用いており、TITech Robot Driver Ver.2 によって速度制御されている。テザーの向きや長さはポテンショメータによって計測し、アナログ電圧をマイコン (HiBot Corp: TITech SH2 Tiny Controller) によって読み取り、モータドライバへの指令値を生成している。

6. 実験

試作した実験機の段差踏破性能を確かめるため実験を行った。車両の推進速度を $0.8[m/s]$ とし、 $5[mm]$ ずつ段差を高くすることで踏破可能な最大段差高さ $80[mm]$ を得た (図9)。この値は動力学シミュレーションの予測値より $10[mm]$ 低い値であるが、通常、歩道-車道間の高さ $90[mm]$ の縁石には角に R があることから問題ないものと考えられる。実際、屋外の縁石上で踏破実験を行ったところ踏破が可能であることが確かめられた (図10)。

最大段差高さと同車輪半径の比を求めると前後輪では 0.94 、中輪では 0.64 であった。従来の差動2輪駆動型ロボット [4] ではその値はおおよそ 0.3 程度であり、本報で提案した懸架機構が段差踏破性を大きく向上していることが分かる。

図11は $60[mm]$ の段差踏破時に必要な中輪トルクについて動力学シミュレーションで得られる値と実験値を比較している。シミュレーション値は試作機に合わせてモデルを変更した上で計測した。実験値はアクチュ

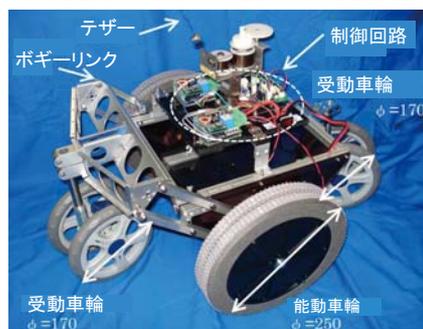


図8 第四次試作機の概観

表.1 試作機の諸元

寸法 [W x D x H]	460 x 670 x 420 [mm]
質量	8.8 [kg] (with tank & batteries)
車輪直径	170 [mm], 250[mm]
最大速度	1.0 [m/s]
電源	鉛蓄電池 : 12V-2.0Ah x 2 (NP2-12, GS Yuasa)
アクチュエータ	20[W] x 2 : Tamiya 380K20
減速比	204
テザー角度センサ	Potentiometer
テザー長センサ	Potentiometer
制御計算機	SH7047F CLK/44.2MHz (Hitachi)
モータドライバ	TITech Robot Driver Ver.2

エータ電流計測値にトルク定数 $2.75[mNm/A]$ 、減速比 204 を乗じることで算出した。実験値は電流値からの推定であるので減速機の効率など誤差を含んでいるが、各輪が段差踏破する際のピーク値がおおよそ同じ値を取っていることが分かる。よって設計したボギーリンク機構が各車輪に適切に車体重量を分散させて段差踏破を実現していることが示唆される。

7. まとめ

本報では差動2輪駆動型の車両の段差踏破性を高めるため両持ち構造で堅牢な新たなボギーリンク機構を提案しそれを最適化することで歩道-車道間の縁石を踏破できる移動体を実現した。今後は想定されるユーザからフィードバックを得てより実用的な機体へと深化させてゆく。

参考文献

- [1] M. Iribe et al.: "Study on a Practical Robotic Follower to Support Daily Life -Mobile Robot Development for Home Oxygen Therapy Patients with the Hyper Tether-", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, pp.316-323 (2011)
- [2] 遠藤玄他: "日常生活支援のための実用的ロボティクスフォロワの研究-第3報: ハイパー・テザーを用いた菱形4輪車両による屋外追従実験-" SICE SI 部門講演会 (SI2009), 2E2-1 (2009)
- [3] "Patrafour(4WD 電動車いす)-仕様・諸元", <http://www.kanto-aw.co.jp/jp/products/wheelchair/spec.html>
- [4] "adept mobilerobots Pioneer P3-DX", <http://www.mobilerobots.com/researchrobots/researchrobots/pioneerp3dx.aspx>
- [5] 広瀬, 古橋, 大司: "4輪惑星探査ローバー飛燕II号機の開発", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.251-252 (1996)
- [6] "Open Dynamics Engine" <http://www.ode.org/>
- [7] 遠藤, 谷, 広瀬: "低コスト大径偏平能動車輪の提案", ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集, 1P1-J11 (2011)

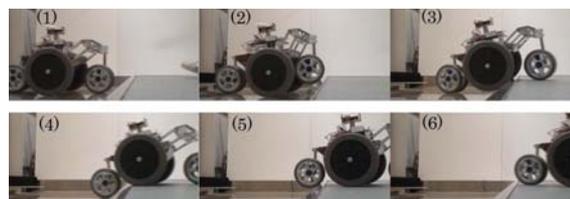


図9 段差踏破実験 : 80[mm]

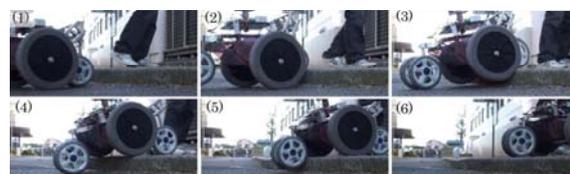


図10 段差踏破実験 : 90[mm] 縁石

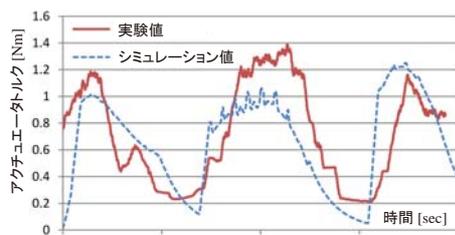


図11 駆動トルク比較 : 60[mm] 段差踏破時