

論文

脚車輪型ロボットの走行シミュレーションと試作

坂下 和広*¹⁾ 薬師寺 千尋*¹⁾ 上野 明也*¹⁾ 益田 俊樹*²⁾

Running simulation and experimental production for a wheeled-leg type robot

Kazuhiro Sakashita*¹⁾, Chihiro Yakushiji*¹⁾, Akinari Ueno*¹⁾, Toshiki Masuda*²⁾

In order to support the industrialization of robot relations in small and medium-sized enterprises, the service robot business-oriented mobile robot base has been developed. In addition to being energy efficient on flat ground, a wheeled-leg type robot is an attractive mobile robot base since it can traverse different levels of ground. A simulation of a stable run for a wheeled-leg type robot on flat ground was carried out using an ODE (Open Dynamic Engine). The results showed that industrialization can be achieved at an appropriate cost. Moreover, from this result, the construction of a prototype guidance robot is reported.

キーワード：脚車輪型ロボット，サービスロボット，ロボット開発環境，メカトロニクス，シミュレーション

Keywords : Leg wheel type robot, Service robot, Robot design environment, Mechatronics, Simulation

1. まえがき

中小企業が独自のサービス機能を付加したサービスロボットを開発し，事業展開する際に活用が可能な汎用のベースロボットの開発が望まれている。そのような用途に資するため，既存の脚車輪型のロボットの構造^{(1)~(3)}を参考に，膝構造で姿勢に自由度を持つ脚車輪型移動ベースを検討した。

事前検討の結果，走行制御せずに等トルク駆動で走行を行うと直進せずに旋回したり転倒する可能性が懸念された。一方，複雑な走行制御なしに安定して直進することは，基本性能として重要であるため，安定して直進するための設計条件をシミュレーションにより検討することとした。

本論文では，まず，シミュレーションで脚車輪型移動ベースが安定して直進する条件を確認し，その結果に基づき脚車輪型ベースロボットを試作した。なお，シミュレータはゲーム開発や，ロボット研究開発で多く利用されているオープンソースの3次元剛体動力学シミュレータであるODE (Open Dynamic Engine)⁽⁴⁾を利用した。

2. 脚車輪型移動ベースの機構

2.1 脚車輪型移動ベースの基本仕様 脚車輪型移動ベースは人間の歩行のような動歩行型の二足歩行に比べエネルギー効率が良く，車輪駆動という既存技術で作成できるメリットがある。さらに，将来，脚部に二輪の倒立振子の制御技術を取り入れて段差昇降，障害物の跨ぎ越しなどの高度な移動動作に展開できる可能性を有している。また，サービスロボットは，人間の生活環境で共生することが重要であるので，人間に恐怖心を与えない範囲で人間とほぼ同等のサイズ，重量を有することが基本と考える。これらの理由で，脚車輪型の機構を移動ベースとして選択した。図1に今回の脚車輪型移動ベースを採用したサービスロボットの基本仕様を示す。

2.2 シミュレーションモデル 脚車輪型ロボットの下半身の移動ベース部分をモデル化して，その走行性能のシミュレーションを行った。図2にモデルの外観(CG)を，図3に概要を示す。また，表1にシミュレーションモデルを構成する各パーツと関節の概要と諸元を示す。シミュレーションモデルは天板と横棒の2つからなる胴体，両腿，両脛，両側にホイールを持った2つの足（横棒）から構成されている。横棒の胴体の中心点を車体設計の原点（車体の位置座標）としている。

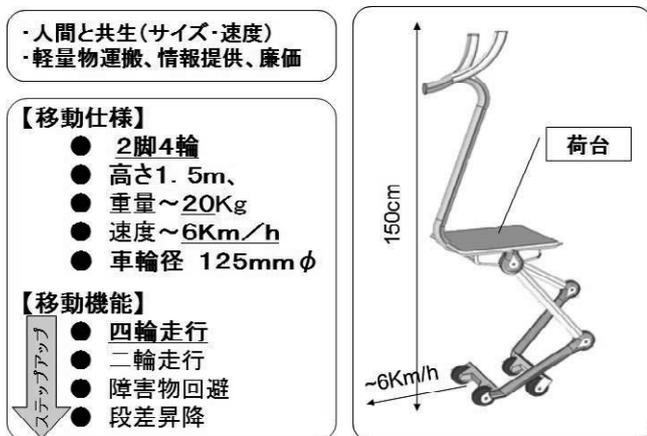


図1. 脚車輪型移動ベースによるサービスロボットの基本仕様

事業名 平成23年度 基盤研究

*¹⁾ システムデザインセンター

*²⁾ 機械技術グループ



図2. シミュレーションモデルの外観 (CG)

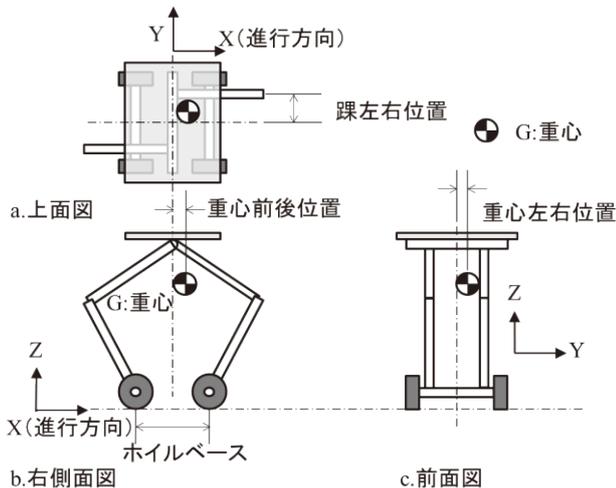


図3. 脚車輪型移動ベースのシミュレーションモデル

2.3 シミュレーションの方法 今回のシミュレーションでは、モデルの構成要素のうち腿と脛の相対配置位置、角度を変化させて姿勢を変更させ、天板の相対位置を動かして重心の相対位置を調整した。姿勢と重心の位置を変えた各モデルに対して、平地で一定の回転トルク(0.1N/m)を四輪に与え続けて直進安定性を調べた。具体的には、開始から0.5秒後に各車輪に一定の回転トルクを与え続け、40秒間の直進走行の様子を調べた。この間、操舵、トルクコントロールなど、直進させるためのフィードバック制御は行わないこととした。

3. 結果

3.1 両膝の姿勢の影響 最初に、両膝を後方につき出した図2に示す姿勢(両膝後屈)、左膝を後方、右膝を前方に突き出した図3に示す姿勢(膝前後屈)、両膝を前方に突き出した姿勢(両膝前屈)の3姿勢に対して重心の位置を各々後方-0.045m、前後中央、前方0.052mの位置になるよ

表1. シミュレーションモデルの構成要素と諸元

パーツ名	形状・種類	数量	サイズ(m)	Weight (Kg)
胴体(天板)		1	0.4x0.4x0.02	1
胴体(横棒)	カプセル	1	r:0.03,L:0.24	1
腿	カプセル	2	r:0.02,L:0.41	0.5
脛	カプセル	2	r:0.02,L:0.37	0.5
足(横棒)	カプセル	2	r:0.02,L:0.4	0.5
タイヤ	球	4	r:0.0625	0.5
腰関節	スライダー	1	固定 バネ係数 ERP: 0.0 ダンバ係数 CFM: 0.0 耐力 FMAX: 無限大	0
股関節	ヒンジ	2		0
膝関節	ヒンジ	2		0
踝関節	ヒンジ	2		0
ホイール関節	ヒンジ	2		回転可能 耐力 FMAX: 0.0

表2. 両膝の姿勢と重心の前後位置による実験結果

重心の前後位置	膝ポジション		
	両膝後屈	膝前後屈	両膝前屈
後方 -0.0448m	転倒	転倒	転倒
前後中央	ほぼ直進	ほぼ直進	ほぼ直進
前方 0.0519m	直進	直進	直進

脚: 左右端, ホイールベース: 0.2m, 重心左右位置: 中央

うに、胴体(天板)の位置をスライドさせて調整したものの合計9通りの条件に関して、シミュレーションを実施した。表2にその結果を示す。この表に示すように、膝の姿勢とは無関係に、重心が後方に位置することで車体は旋回し転倒に到ることが判明した。

3.2 重心の前後位置と直進安定性 次に重心の前後位置の度合いと旋回、転倒の発生のしやすさを調査するために、重心の前後位置(中央からの距離)を変えて直進安定性を調べた。3.1の結果、両膝の姿勢は影響しないので、後屈の姿勢で固定とし、天板を前後にずらすことで、重心の

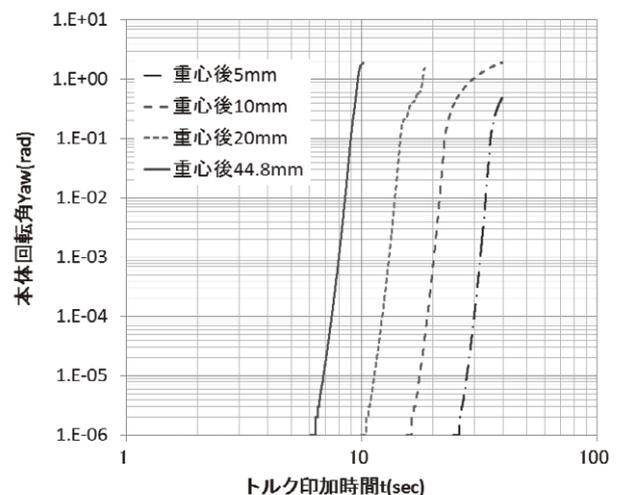


図4. 重心の前後方向の移動と直進安定性

前後位置を調整した。図4にシミュレーション結果から得られた旋回(本体の回転角Yaw(rad))の時間経過を示す。横軸はトルクを印加し始めてからの経過時間t(sec), 縦軸は地平面上の車体の回転角度Yaw(rad)である。車体が一度曲がり始めると経過時間tの30乗近い関数で急激に回転角度が増加していくことがわかる。また, 重心の中央からの前後位置の値が倍になると6桁程度回転角度が増加することも読み取れる。

3.3 重心の左右位置と直進安定性 重心の左右位置を変えて直進安定性を調べた。膝は同様に後屈の姿勢で固定とし, 天板の位置をずらすことで重心の前後位置を中心に保ちつつ重心の左右の位置を変化させた。

図5に結果を示す。横軸はトルクを印加し始めてからの経過時間t(sec), 縦軸は地平面上の車体の回転角度Yaw(rad)である。横方向の重心の変化に対しても大きく進路を変えて旋回するが, その度合いは前後位置の変化に比べると緩やかで, 経過時間tに対して約2乗の関数であった。また, 重心の中央からの左右位置の値が倍になると2桁程度回転角度が増加することもグラフから読み取れ, これも前後位置の変化に対して緩やかなものになっていた。また, 重心が前後(特に後ろ)に移動し旋回を始めると転倒に至るのに対して, 横方向の変動に関しては, 旋回はするものの転倒に至るケースが少なかった。

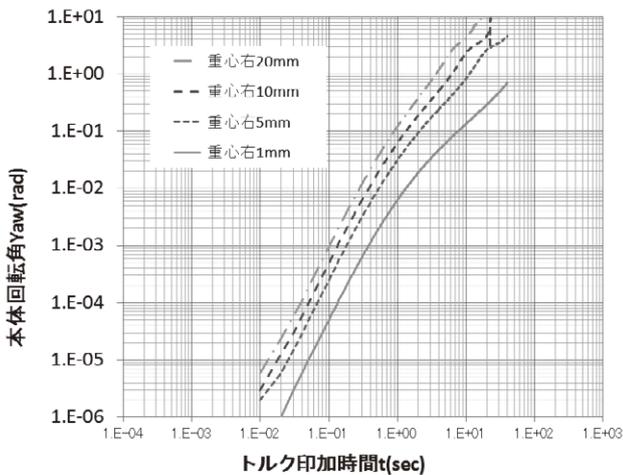


図5. 重心の左右方向の移動と直進安定性

3.4 両蹠の位置と直進安定性 モデルの姿勢が直進安定性に影響を与えないことを確認するため, 両蹠の左右位置と直進安定性の関係を調査した。後屈の姿勢で固定し重心の前後位置を前, 中心, 後ろの3通りに設定し, 両蹠のポジションを両蹠とも左右輪の中心, 左脚の蹠は中心で右脚の蹠は右に50mmずらして重心の位置を右に7.14mmとした位置, 上記2番目の条件で天板を左に移動し重心の位置を左右中央にした位置の3条件で直進安定性を確認した。条件と結果を表3に示す。今回のシミュレーションでは蹠の位置と直進安定性についての相関は認められず, 重心の移動により旋回が生じていることがわかった。ただしこの

表3. 両蹠の位置と直進安定性

重心の前後位置	両蹠ポジション		
	両方中心	左:中心 右:50mm 重心:右7.14mm	左:中心 右:50mm 重心:中心
後方 -0.0448m	転倒	右旋回 約10周	転倒
前後中央	ほぼ直進	右旋回 約1周	ほぼ直進
前方 0.0519m	直進	右24度旋回	直進

膝ポジション後屈, ホイールベース: 0.2m

実験では, 結果として重心を後方にしかつ, 右に移動した条件での実験が含まれている。この結果は, 右への旋回は生じるが転倒に至っておらず, 重心の左右への移動により転倒しにくくなる可能性が示されたと考える。

4. 考察

図6に車輪の位置と重心の位置による回転力の関係を示す。各車輪に加えられる回転トルクが同一であるとすると, 重心の左右位置から車輪までの距離 $l_{f3}:l_{f4}$ の比がモーメントの比 $M_{f3}:M_{f4}$ となり, 図においては $M_{f3}>M_{f4}$ となり, 右方向に旋回する力が発生する。一方後脚でも同様の事象が生じる。この結果, 車体全体としては右に旋回することになる。このことは, 重心を左右に移動した場合にtの二乗に比例した旋回を始めることも合致する。また, 旋回時に発生する遠心力と旋回の中心側に移動した重心の合成力が釣り合う方向に回転角速度が落ち着く。これが, 左右の重心移動による旋回時に結果として転倒にあまりいたらない要因と推察した。以上のことから, 重心の左右に移動することによる旋回は, モーメントの差により生じるものと考えた。

一方, 重心が後ろに移動した場合に発生する旋回現象は, 印加時間tの30乗に近い割合で回転角度が増加するという激しい変化をもたらし, 結果として転倒するケースが多かった。その主要因をモーメント力とすると, 遠心力と重心の合成力は旋回の外側に向かい, 結果としてモーメントの比は反対方向へ旋回する力として働くはずで, 負の帰還が働くはずである。しかし結果としては正帰還がかかったかのように激しく旋回が進行し説明がつかない。現時点でメカニズムの解明に至っておらず, 今後の課題としたい。

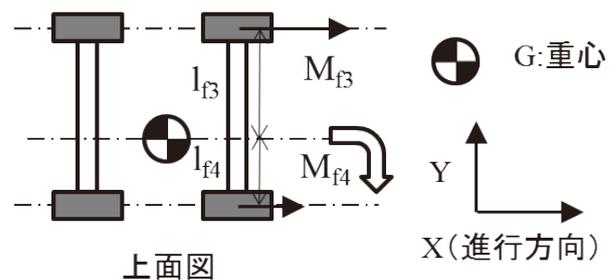


図6. 重心の左右方向の移動と回転力

また、今回のモデルでは膝の姿勢、踝の位置などが直進走行性能に与える影響は認められなかった。

脚車輪型移動ベースの設計においては、重心の位置を後ろに持ってこない配慮が重要であることが判明したが、実際の機構は完全剛体ではなく、材料の変形、関節部の曲がり、遊びなどの要素も考慮することが必要であることが予想される。今後、試作したロボットとの整合を確認しながら、材料の変形、関節の曲がり、遊びなどを考慮したシミュレーションが必要になるか検討を加えていきたい。

5. 試作

シミュレーションの結果を用いて、移動ベースを試作し実物のロボットに適用した。適用したロボットは、試作中の室内で使用する案内ロボットである。試作にあたって、まずは、脚車輪のイメージを維持したうえで、四輪走行の躯体を実現することとした。また、実際のロボットが活動するイメージをつかむために、案内ロボットという用途に絞り、デザイン性の高い試作機を製作した。図 7 に試作し



図 7. 案内ロボット

たロボットの写真を示す。この試作機では、2 輪の駆動輪と 2 輪のキャスターという組み合わせとした。試作機は、約 4W の DC モーター 2 個(ギア比は 84 : 1、電源は 24V、左右車輪に各 1 本)と、駆動制御用マイコン基板、リチウムイオンバッテリー、通信並びに全体制御用のノート PC を搭載し総重量は約 15kg となった。この試作機は方向制御をしない簡単な速度制御のみによって時速 4Km/h 前後で安定した直進走行することが確認できた。

6. まとめ

中小企業によるサービスロボットの開発と事業化に向けた汎用ロボットベースのための脚車輪型移動ベースの走行シミュレーションを行い、直進走行条件を検討した。4 車輪の接地点で形成される四角形の中心から、重心位置が後方ないしは左右にずれる構造では、直進安定性が損なわれ、重心位置を左右中央でかつ前方に持つてくることで安定走行が得られることが明らかになった。また、左右への重心移動による旋回はモーメント力の比にしたがって発生し、後方への重心移動による旋回と要因が異なっていた。

これらの結果をふまえ、脚車輪型移動ベースを用いた案内ロボットを試作し、方向制御なしでの直進走行を実現した。

今後は、開発した移動ベースの軽量化と各種アプリケーション用途に容易に適用できる様にするため、制御ソフトウェアの再利用が容易な Open-RTM に対応する予定である。

(平成 24 年 5 月 30 日受付, 平成 24 年 8 月 20 日再受付)

文 献

- (1) Flexible Locomotion Control of a Self-contained Biped Leg-wheeled System, 松本, 梶田, 小森谷, Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2599-2604, (2002)
- (2) Structure and locomotive modes of a self-contained biped leg wheeled system, 松本, 梶田, 小森谷, S-J キム, Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, pp.299-306, (2002)
- (3) 脚車輪型移動ロボット IMR-Type1 の開発 (NEDO 次世代ロボット実用化プロジェクト(プロトタイプ開発支援事業), 生活を支援するロボメカ技術のメガインテグレーション), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2005)
- (4) 力学シミュレータ “Open Dynamics Engine” と普及型四脚歩行機械 “TITAN-VIII” を用いた学部生実験課題, 遠藤, 福島, 広瀬, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 1L2-6, (2010)
- (5) RT-Middleware: Distributed Component Middleware for RT (Robot Technology), Noriaki ANDO, Takashi SUEHIRO, Kosei KITAGAKI, Tetsuo KOTOKU, Woo-Keun Yoon, 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp.3555-3560, (2005).