

段軸アクティブサスペンションを用いた脚車輪型移動ロボットの 斜面不整地適応性の向上

An Improvement of Terrain Adaptability of Legged Wheel Robot Using Active Suspension

○上野 澄人, 王志東, 高橋 隆行, 中野 栄二

○Sumito Ueno, Zhi-Dong Wang, Takayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード： 脚車輪型ロボット (Leg-Wheel Mobile Robot), パッシブコンプライアンス (passive compliance), アクティブサスペンション (active suspension), 不整地 (rough terrain)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 情報科学研究科 中野研究室(青葉山キャンパス機械系) 上野 澄人, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: ueno@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在, 車輪式, クローラ式, 脚式などの不整地移動機械の研究は数多くなされている. 特にそのポテンシャルの高さから脚式の不整地移動機械の研究は古くから行われてきた^{1) ~ 6)}. しかし, 実社会で活用できるような不整地移動能力が得られているとは言いがたい.

その理由として脚機構は構造が複雑でコストがかかること, 制御が難しくなることなどが挙げられる. さらに不整地移動の一般的問題として不整地センシングの難しさが挙げられる.

このような現状を打破するために中野研究室において開発されたのが, 脚と車輪を独立に備えた脚車輪型移動ロボット (Leg-Wheel Mobile Robot: LWMR) である^{7) ~ 9)} (図1). このロボットは, 車輪で本体重量の約半分を支えているため, 脚の垂直方向の荷重分担が軽減され, エネルギー効率

に優れている. また, 常に車輪が接地しているために脚機構のみのロボットに比べて安定性も高い. さらに, 脚車輪パッシブ混合歩容 (LWPCG)^{10) ~ 12)} という移動手法によって未知の不整地を, 外界センサに依存せずに移動することが可能である.

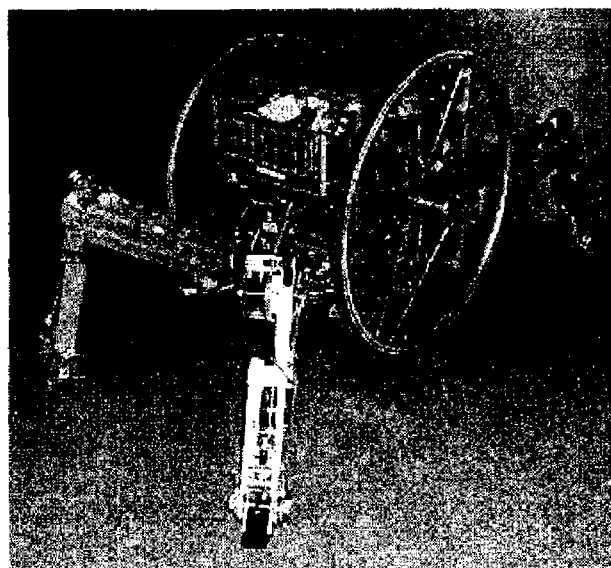


図1 LWMR

1.1 目的

本研究の目的は、このLWMRの実用化に向けて、特に斜面をベースにした不整地での移動能力を向上することである。

LWMRはその形状から、横方向の安定性は前後方向のそれに対して比較的小さくなる(図2)。

そこで車輪部にアクティブサスペンションを設け、それを活かしてロール方向の揺れを抑制し、斜面を横断する場合や、凹凸を越える場合の横転の危険性を低くする。

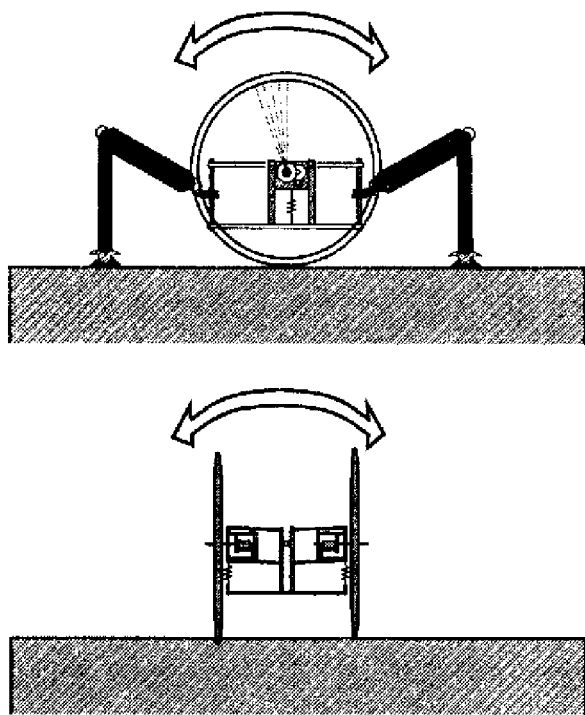


図2 LWMRの安定性

1.2 関連研究

谷ら¹³⁾は、アクティブサスペンションを備えた4輪の車輪型不整地移動ロボットを開発し、未知の凹凸路面を走行させている。このロボットは、ダイレクトドライブモータとチェビシェフリンク機構からなるバックドライブブルなアクティブサスペンションを力制御している。

米田ら¹⁴⁾は4脚の歩行機械(TITAN VI)を開発し、未知の凹凸路面を歩行させている。このロボットは絶対座標系と本体の間に仮想的にインピーダンスを設けるよう、脚を力制御している。

2. 脚車輪型移動ロボット(LWMR)の構成

2.1 LWMR

LWMRは3自由度の脚を4本と、それぞれ独立に駆動する車輪を2つ備えている。各関節と車輪は、DCモータとバックドライブブルなギアトレインで構成され、その回転角度を検出するためにエンコーダが取り付けられている。車輪駆動部は並行リンク機構で本体と接続され、本体は車輪の駆動部からバネで吊下げられている(図3、表1)。

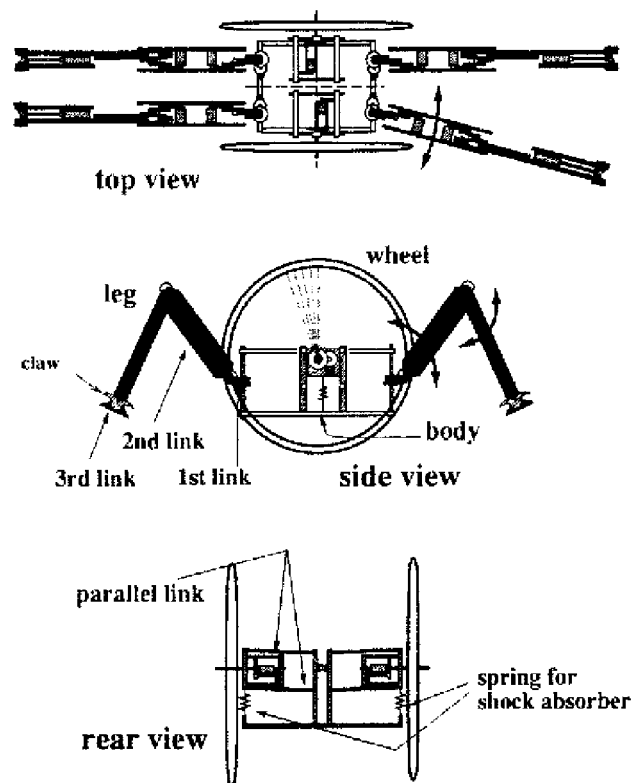


図3 LWMRの構成

2.2 サスペンション

アクティブサスペンションはDCモータとリンク角度計測用のポテンシオメータを備えている。モータの発生するトルクは、バックドライブブルなギアトレインとクランク状のリンク機構を通じて車輪駆動部に、鉛直に、ほぼ直線的な力として作用する(図4、表2)。

表1 LWMRの緒元

寸法	(1000~1800)×600×500 全長×全高×前幅[mm]
重量	23kg(有線動作時) 38kg(自立動作時)
材質	アルミ合金
移動速度	0.1 m/s
脚	3自由度×4本
車輪	1自由度(回転)×2輪
車輪半径	320mm
トレッド	470mm
制御機器	Transputer T800 UPP(HD63140CP)
制御周期	15ms
センサ	エンコーダ, ポテンシオメータ, 振動ジャイロ, 傾斜計
アクチュエータ	DCモータ(24V40W)×14ヶ
アクチュエータ 駆動方式	PWM駆動 PID制御
駆動電源	アクチュエータ:DC24V 制御機器:DC5V

表2 サスペンションの緒元

サスペンション 方式	パラレルリンク (クランク型リンクで駆動)
サスペンション ストローク	120mm
段軸量最大時の 本体ロール角	15°
センサ	ポテンシオメータ
サスペンション アクチュエータ	DCモータ 24V 72W ×2ヶ
サスペンション ギアトレイン	1:49.5 (平歯車1段, 遊星ギアヘッド2段)
サスペンション 駆動方式	PWM駆動 PID制御
駆動電源	アクチュエータ:DC24V 制御機器:DC5V

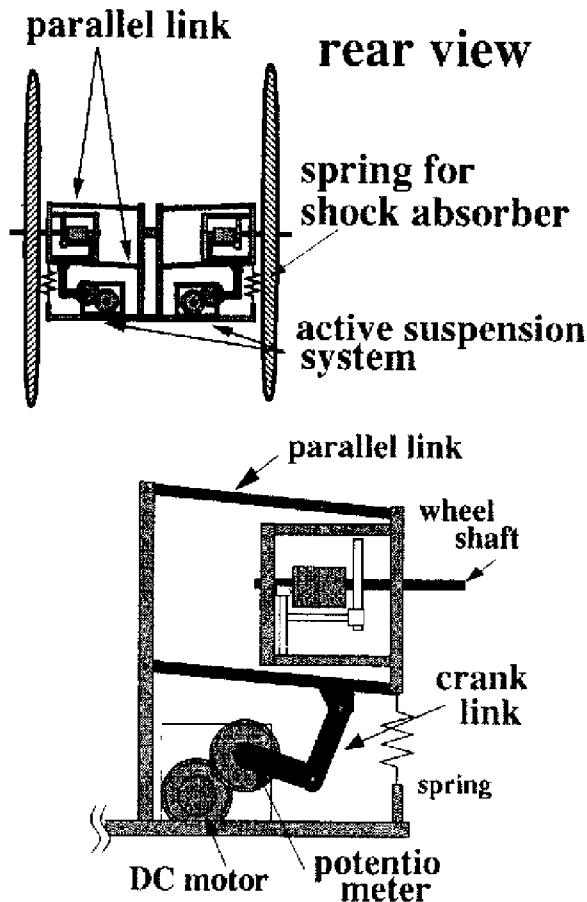


図4 アクティブサスペンションの構成

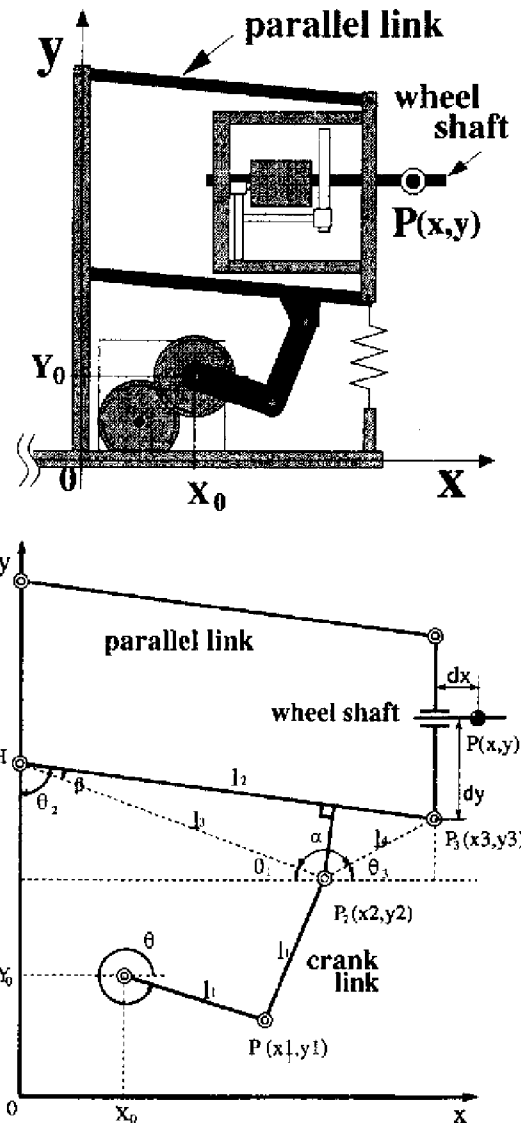


図5 サスペンションの座標系(右半分)

次にサスペンションの順・逆運動学を示す。座標系は図5のように定める。

運動学

$$P = P_3 + d \quad (1)$$

$$P_3 = P_2 + d_{23} \quad (2)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{l_3^2 + (H - y_2)^2} \\ \frac{4x_1^2 H - AB + \sqrt{D}}{A^2 + 4x_1^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta) + X_0 \\ l_1 \sin(\theta) + Y_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$d_{23} = \begin{bmatrix} -l_4 \cos(\theta_1 + \alpha) \\ l_4 \sin(\theta_1 + \alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = 2(H - y_1) \quad (7)$$

$$B = x_1^2 + y_1^2 + l_3^2 - l_1^2 - H^2 \quad (8)$$

$$D = AB - 4x_1^2 H^2 - (A^2 + 4x_1^2)(B^2 + 4x_1^2(H^2 - l_3^2)) \quad (9)$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{H - x_2}{l_3}\right) \quad (10)$$

逆運動学

$$\theta = 2\pi + \arctan\left(\frac{y_2 - Y_0}{x_2 - X_0}\right) - \arccos\left(\frac{\sqrt{(x_2 - X_0)^2 + (y_2 - Y_0)^2}}{2l_1}\right) \quad (11)$$

$$P_2 = P_3 - d_{23} \quad (12)$$

$$P_3 = P - d \quad (13)$$

$$d = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$d_{23} = \begin{bmatrix} -l_4 \cos(\theta_1 + \alpha) \\ l_4 \sin(\theta_1 + \alpha) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} + \beta - \theta_2 \quad (16)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{x_3}{l_2}\right) \quad (17)$$

なお、クランク機構による出力の非線形性を補償するため、実際出力トルク F_{out} は以下の式のようになる(図6)。

$$F_{out} = \frac{1}{\cos \theta_1 \cos \theta_2} F \quad (18)$$

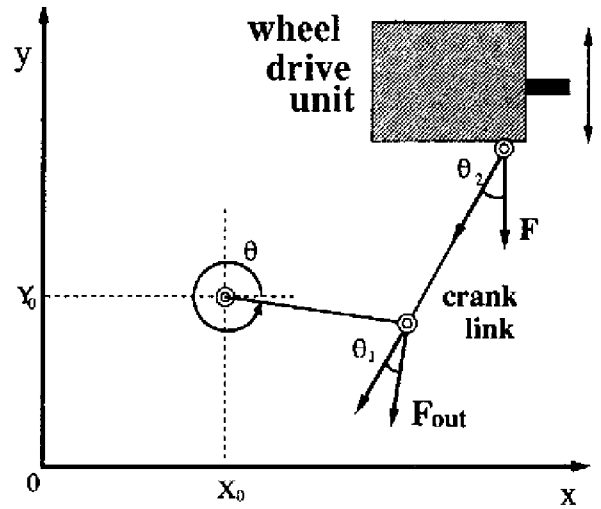


図6 非線形性の補償

サスペンションはリンク角度の目標値に関してPID制御されている。サスペンション部単独のステップ応答を図7に示す。鉛直下向き、本体を押し上げる方向に目標値を定めている。

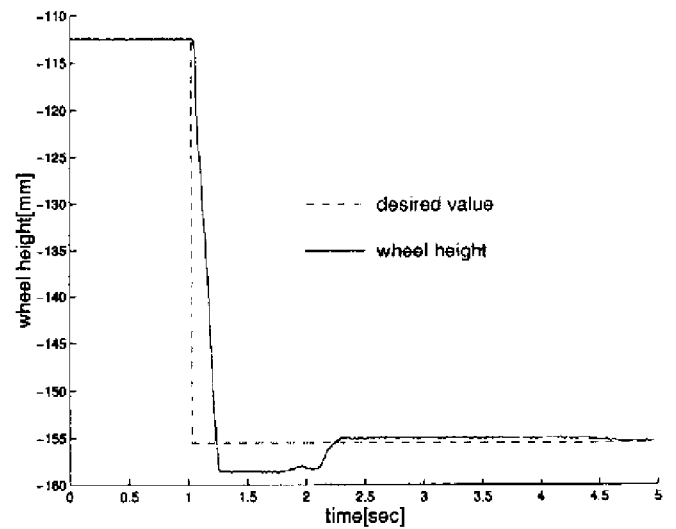


図7 サスペンションのステップ応答

3. 制御則

3.1 脚車輪パッシブ混合歩容(LWPCG)

脚車輪パッシブ混合歩容とは、脚先に一定の大きさのコンプライアンスをソフトウェア的に設けた上で、あらかじめ設定されている一定の脚先軌

道を脚がトレースする移動方法である。路面の多少の凹凸は、脚先と車輪のサスペンションのコンプライアンスによって吸収されるため、詳細な地形情報は不要である(図8)。

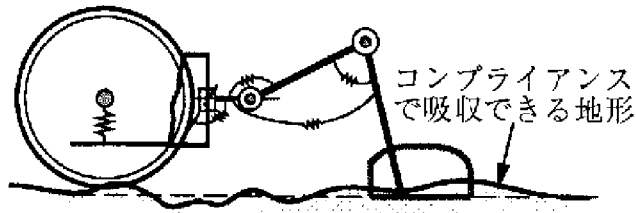


図8 LWPCG

また、コンプライアンスで吸収しきれない大きな段差などに対しては、能動的に脚先軌道を上下方向にずらすことで対応する(図9)。これを脚先軌道のシフト動作という。

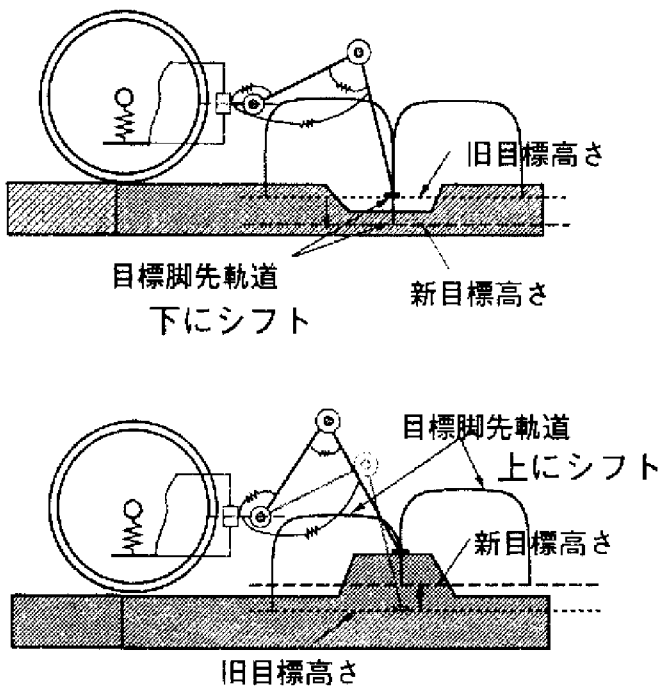


図9 脚先軌道のシフト

3.2 ロール角の検出

本体の姿勢制御をするにあたって本体の傾き角を検出することは不可欠である。これには内界センサ、外界センサを用いる方法がある。本研究では安価で取り扱いやすい内界センサとして振動ジャ

イロと傾斜計を用いる。

しかし実際には、ジャイロの積分値は時間とともにドリフトしやすく、傾斜計は高周波領域の動揺に追従しにくい。

そこで、高周波領域ではジャイロの積分値を、低周波領域では傾斜計の出力を重視するようなデジタルフィルタをソフトウェアで設定し、二つのセンサを組み合わせ使用した¹³⁾。

実際に適用したデジタルフィルタは以下のようになる。

$$\theta_k = \frac{1}{a+1} ((a-1)\theta_{k-1} + Y_{k-1} + Y_k + T(V_{k-1} + V_k)) \quad (19)$$

$$a = \frac{2T}{t} \quad (20)$$

周波数領域で表現すると

$$\theta(s) = \frac{1}{Ts+1} Y(s) + \frac{T}{Ts+1} V(s) \quad (21)$$

ただし、

$$\theta : \text{推定ロール角度} \quad (22)$$

$$Y : \text{傾斜計の出力} \quad (23)$$

$$V : \text{ジャイロの出力 (角速度)} \quad (24)$$

$$k : \text{サンプリングの回数} \quad (25)$$

$$t : \text{サンプリング周期} \quad (26)$$

$$T : \text{フィルタの時定数} \quad (27)$$

である。今回は実験により $t=0.015[s]$ 、 $T=1.5[s]$ と定めた。

3.3 姿勢制御

内界センサによってロール角度を計測し、本体の傾きをキャンセルする方向に車輪サスペンションの段軸量を増減する。

トレッドを $2W$ 、本体のロール角度を θ (右上がりを正) とすると、制御対象の左右の車軸目標高さ Y_L, Y_R は

$$Y_L = Y_{org} - W \sin \theta \quad (28)$$

$$Y_R = Y_{org} + W \sin \theta \quad (29)$$

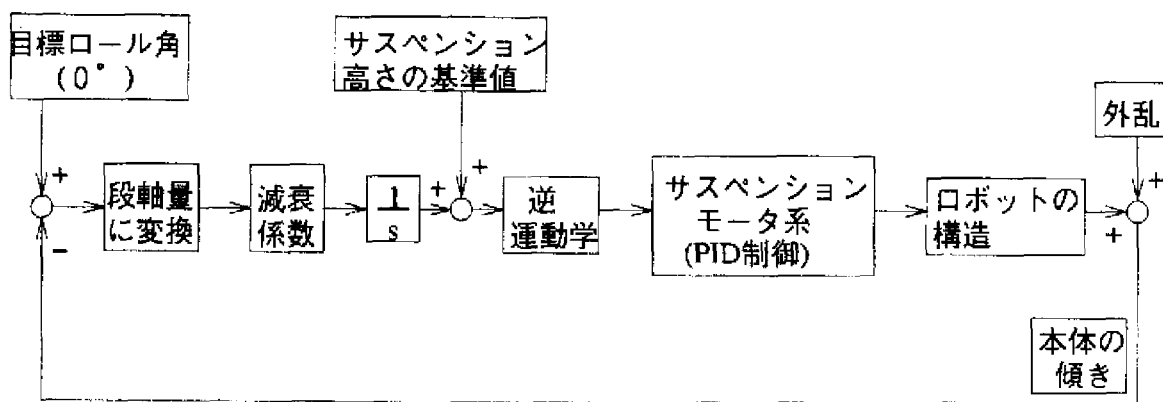


図 10 制御系のブロック線図

となる(図11)。ただし Y_{org} は、本体が水平時の車軸高さである。これで得られた車軸高さ Y に関してPID制御を行う。この制御系のブロック線図を図10に示す。

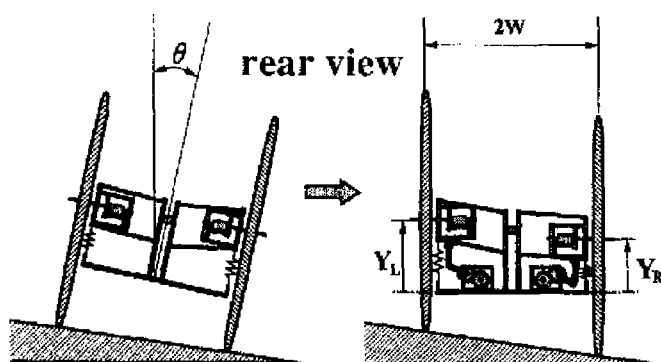


図 11 姿勢制御

サスペンションによる本体の姿勢制御によって、本体と路面の相対位置関係は変化するが、それに対して脚は、コンプライアンスと、目標軌道のシフトで自動的にその変化にならい、歩行を続ける。

4. 実験

前項で述べた方法の有効性を実験機を使って実際に確認する。

4.1 実験方法

平坦な路面上に凸段差を配置し、その上を歩行させる。代表的な段差のパターンとして右の車輪側のみに段差がある場合(段差高さ6cm, 車輪半径の19%), 片輪ずつ左右交互に段差がある場合(同3cm, 9%)の2通りの実験を行う(図12)。

さらに、屋外環境下で歩行実験を行う。傾斜角が約 5° ~ 25° と徐々にきつくなる斜面を斜めに登坂させる。

それぞれ、サスペンションを制御した場合と、サスペンションを自由にした状態でのロール方向の揺れを比較する。

なお、いずれの実験も事前に環境情報をロボットに与えていない。また、傾きが分かりやすいよう本体の上面に三角形の旗を取り付けている。

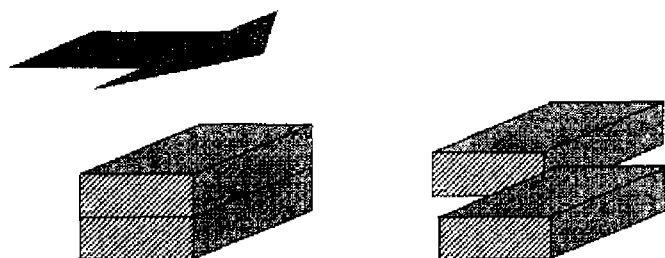
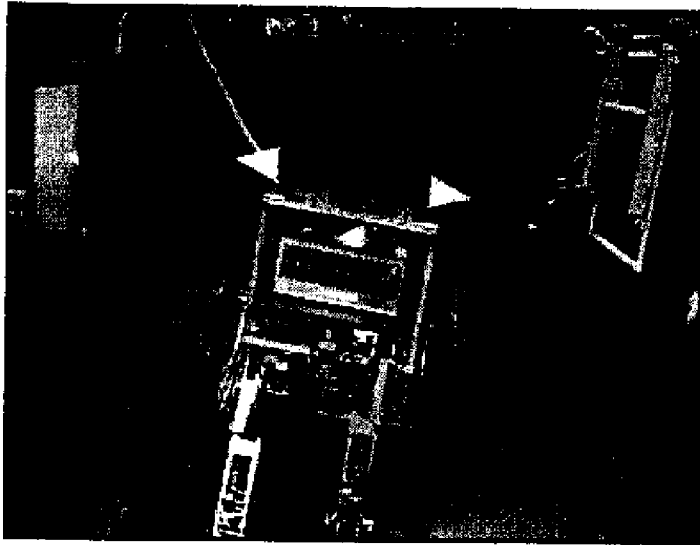


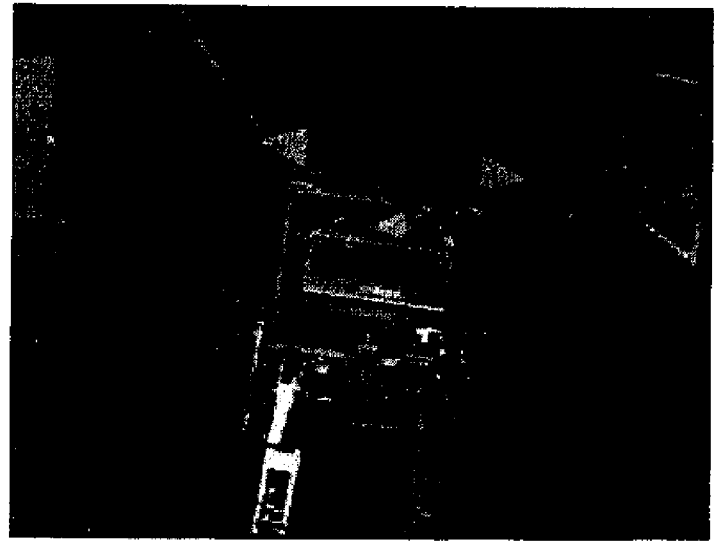
図 12 段差の形状

4.2 実験結果

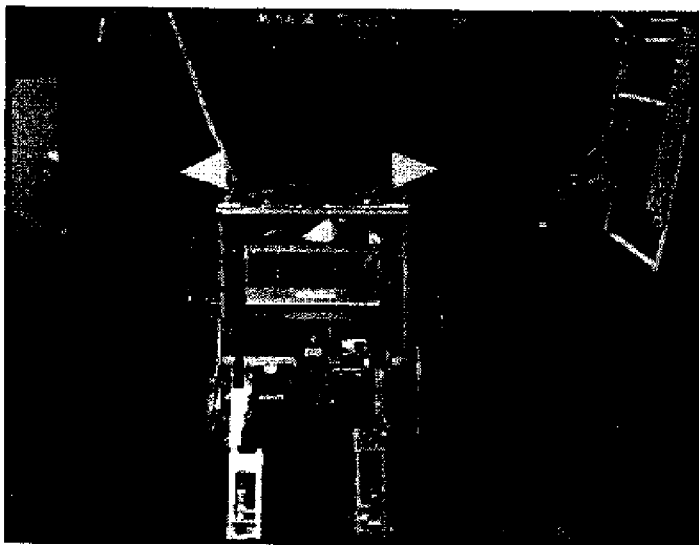
以下に、実験結果を示す。ロボットの最大傾きと、傾きの自乗平均を表3に示す。ロール角度は進行方向に向かって右側が上がる場合をプラスとしている。歩行速度は 0.1 m/s で、歩容1周期は4秒である。



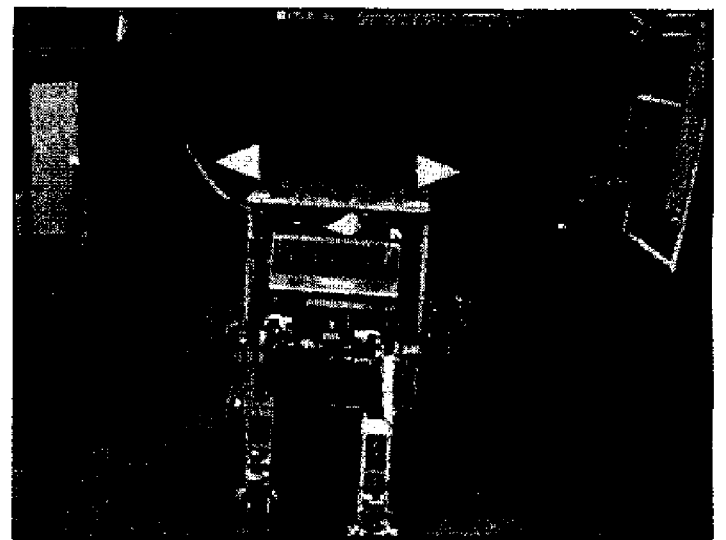
13(a)サスペンション自由の場合



14(a)サスペンション自由の場合



13(b)サスペンションを制御した場合



14(a)サスペンションを制御した場合

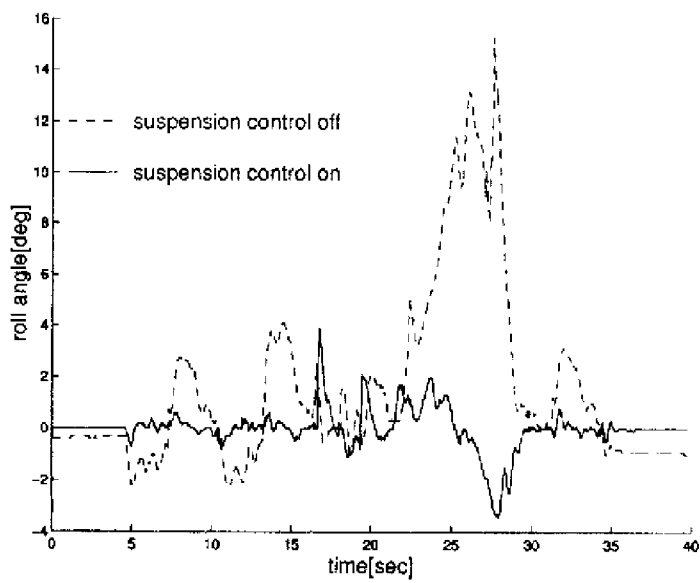


図 13 片側段差越え実験結果

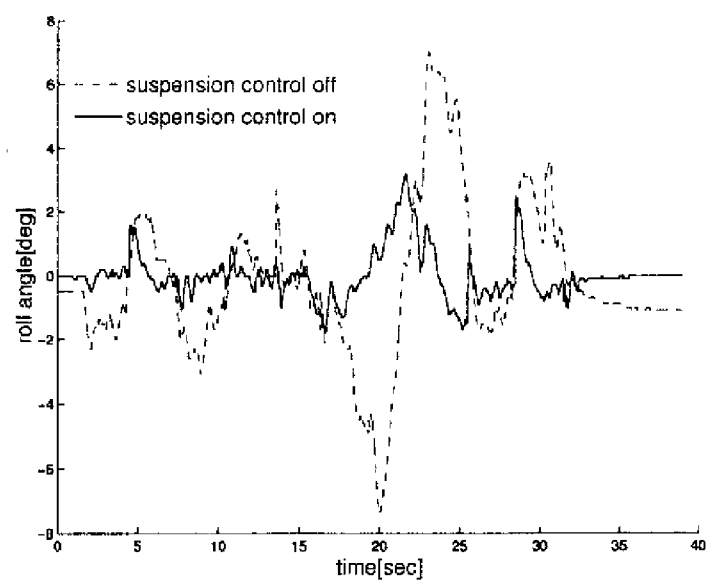


図 14 両側段差越え実験結果



15(a)サスペンション自由の場合



15(a)サスペンションを制御した場合

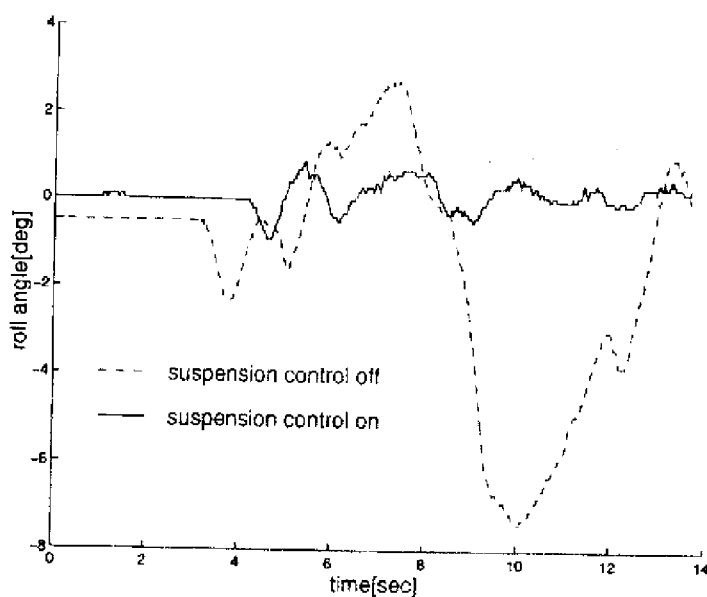


図 15 屋外実験結果

表 3 実験結果

サスペンションの制御	最大傾き		自乗平均	
	無	有	無	有
片側段差	15.3°	3.9°	12.9	0.5
両側段差	-7.4°	3.2°	5.6	0.6
屋外斜面	-7.4°	0.9°	9.1	0.1

図13～図15と、表3から、サスペンションを制御した方がロール方向の傾きが小さくなっていることが分かる。

また、図13のグラフの始めの約15秒間、ロボットが凸段差に差しかかる前の部分を拡大したものが、図16である。このグラフから、平坦な路面を移動する際の周期的揺動も抑えられていることが分かる。通常、LWMRは脚の位相が切り替わる際に発生する周期的揺動を抑えるよう、脚のコンプライアンスの大きさを周期的に変化させている¹⁵⁾が、本体の重量の約半分を支えている車輪サスペンションを活用することで、より高い制振効果が得られたものと考えられる。

以上のことから、アクティブサスペンションによって横揺れが効果的に抑えられたことが確認された。

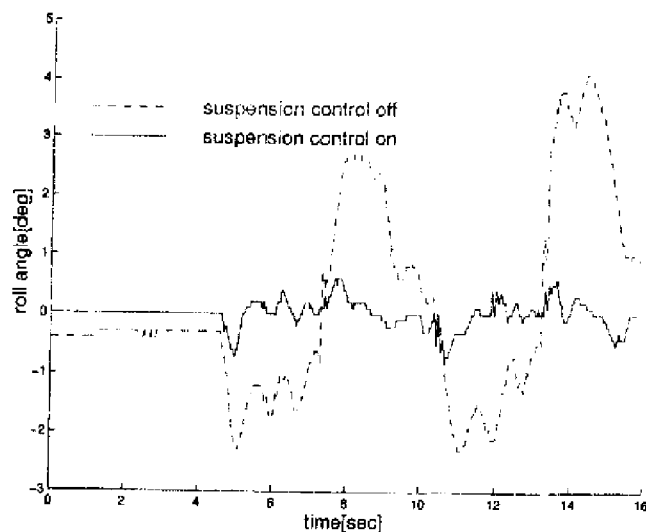


図 16 平地移動時の動揺
(図13の拡大図)

5. おわりに

車輪のアクティブサスペンションを活用して脚車輪型移動ロボット (LWMR) の不整地適応性を向上させる方法を提案した。

実機を用いて実験し、サスペンションを制御することで本体の姿勢変動が抑制されること示し、その方法の有効性を確認した。

今後の課題として、脚と車輪サスペンションの協調制御、サスペンションの制御則の高度化などが考えられている。

参考文献

- 1) 広瀬茂男, 福田靖, 菊池秀和: 4足歩行機械の制御システム, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4, 46/65 (1985)
- 2) 馬場賢二, 牧野洋一, 金子俊一, 本多庸悟: 傾斜センサを用いた4脚歩行ロボットの歩行制御, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 563/564 (1992)
- 3) C.A.Klein, K.W.Olson and D.R.Pugh: Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicles over Irregular Terrain, The International Journal of Robotics Research, Vol.2, No.2, 3/17 (1983)
- 4) D. A. Messuri and C. A. Klein: Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-1, no. 3, 132/141 (1985)
- 5) 安達弘典, 小谷内範穂, 中村達也, 中野栄二: 脚に設置された力センサを用いた4脚歩行ロボットの適応歩容, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, 707/717 (1991)
- 6) 米田完, 飯山浩幸, 広瀬茂男: 4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 ~その21 力情報を用いた歩容制御, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 575/578 (1992)
- 7) 中野栄二: 走行ロボットの走行制御装置, 特願平7-289966 (1995)
- 8) 中野, 木村, 野中: 脚車輪分離型ロボットの開発および車輪走行時の胴体揺動抑制, 日本機械学会論文集(C編), vol.58, no.551, 2138/2143(1992)
- 9) 木村, 中野, 野中: 脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作, 日本ロボット学会, Vol.10, No.4, 520/525 (1992)
- 10) Yu-Jie Dai, Eiji Nakano, Takayuki Takahashi, Hiroki Ookubo: Cooperational Motion of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, Proceeding of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, Sep.27-29 (1995)
- 11) Y.Dai, E.Nakano, T.Takahashi, H.Ookubo: Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Rough Terrain Environment, ICAR '95, vol.2, 911/916 (1995)
- 12) 戴宇傑: 未知の不整地における脚車輪分離型移動ロボットの移動方式と制御に関する研究, 東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士学位論文, (1996)
- 13) 谷和男, 松本治, 臼井清一, 堀内英一: 不整地走行アクティブサスペンションロボット, 機械技術研究所所報, Vol.46, No.2, 139/155 (1992)
- 14) 米田, 飯山, 広瀬: 4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御, 日本ロボット学会誌, vol.12, No.7, 148/153 (1994)
- 15) 中嶋秀朗: 脚車輪分離型移動ロボットの不整地適応性向上に関する研究, 東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻修士学位論文, (1996)