

脚車輪分離型ロボットによる不整地移動時の 姿勢揺動抑制に関する一手法

A Reduction of Body Pitching and Rolling of Leg-Wheel Robot on Rough Terrain

○中嶋秀朗, 中野 栄二, 戴宇傑, 大久保宏樹, 高橋隆行
東北大学

○Syuro Nakajima, Eiji Nakano, Yu-Jie Dai, Hiroki Ookubo, Takayuki Takahashi
Tohoku University

キーワード: 脚車輪分離型ロボット (Leg-Wheel Robot)
不整地 (Rough Terrain), コンプライアンス (Compliance)
姿勢揺動抑制 (Reduction of Body Pitching and Rolling)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉
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) 中嶋 秀朗
TEL 022-217-7025 FAX: 022-217-7023
E-mail: nakajima@robotics.is.tohoku.ac.jp

1 はじめに

近年ロボットは、製造業分野をはじめ、さまざまな分野で研究が行われ、それぞれの移動方式の長所を生かしたロボットが開発されている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]。林業、建設業などの分野でも、ロボットの開発が行われており、それらの分野では、未知の不整地を移動できることが必須である。

著者らは、林地などの未知の不整地を対象とし、脚と車輪の両機構の利点を生かした脚車輪分離型ロボットを提案し、その研究開発を行ってきた。これまで、二脚二車輪を持った Chariot I と四脚二車輪を持った Chariot II を開発し、脚と車輪の協調動作による段差乗り越え、階段の登りを実現した [4, 5, 6, 7]。また、未知の不整地を路面のモデルなしで移動することを実現し、脚車輪分離型ロボットの不整地への高い適応性を示した

[8, 9]。

そこで提案された方法では、最大で5度以下と大きくはないが、ピッチ角、ロール角に周期的な姿勢揺動が生じている。人や物がロボットに載った場合は、姿勢の揺動は好ましくなく、抑制される必要がある。

本報告では、それぞれの脚の遊脚相と立脚相の切り替わり時にコンプライアンスを変化することで、周期的な姿勢揺動を抑制する方法を提案する。まず、平地時のコンプライアンスの設定法を考え、それを基準にして段差時のコンプライアンスを考える。平地、凸路面、凹路面に対してシミュレーションと実験を行い、さらに不規則凹凸路面についてシミュレーションを行うことで有効性を検証する。

2 Chariot II

2.1 機構

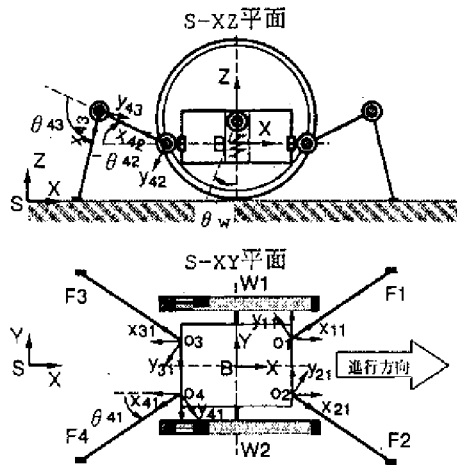


図 1: Chariot II の機構

本報告で対象とする脚車輪分離型ロボット Chariot II を図 1 に示す。胴体の左右に大きな車輪を平行に配置し、前後に 4 本脚を持っている。車輪走行時は、整地を 20km/h で走行できる。また、車輪は大きいため、対地適応性も高い [6, 7]。さらに、車輪軸部には、パッシブサスペンションであるばね機構が取り付けられている。各脚は、3 自由度の回転関節を持つ。

2.2 運動方程式

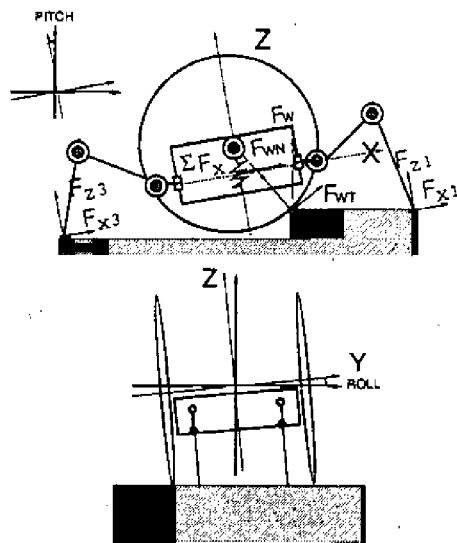


図 2: 運動方程式

図 2 のように記号を表記する。xz 平面での運動を考え、ヨー回転は考えない。このとき、胴体座標系における運動方程式は次のようになる。

z 方向

$$\sum F_{zleg} + \sum F_{zwheel} - \sum Dv_z = M\dot{v}_z$$

x 方向

$$\sum F_{xleg} + \sum F_{xwheel} - \sum Dv_x = M\dot{v}_x$$

ピッチ軸回りの回転

$$\sum F_{zleg}X_{leg} + \sum F_{xleg}Z_{leg} + \sum F_{zwheel}X_{wheel} - D\omega_p = I_p\dot{\omega}_p$$

ロール軸回りの回転

$$\sum F_{zleg}Y_{leg} + \sum F_{zwheel}Y_{wheel} - D\omega_r = I_r\dot{\omega}_r$$

ここで F_{xleg}, F_{zleg} はそれぞれ、 $F_{x1} \sim F_{x4}, F_{z1} \sim F_{z4}$ を表し、 F_{xwheel}, F_{zwheel} は、胴体座標 x, z 方向の F_{wN} と F_{wT} の合力を表す。 $X_{leg}, Y_{leg}, Z_{leg}$ はそれぞれ重心と脚先の胴体座標における x 方向の距離、 y 方向の距離、 z 方向の距離を表す。さらに、 v, ω はそれぞれ速度と角速度、 M, I, D はそれぞれ脚車輪ロボットの質量、慣性モーメント、粘性係数を表し、添字の p, r はそれぞれピッチとロールを表す。

3 姿勢揺動抑制

現在、未知の不整地移動に対応するためには多くのセンサや複雑な計算が必要とされ、実用化への道はなかなか困難である。本来、ロボットにおいて移動は、目的の作業を行う手段であり、目的ではない。そこで、外界からのフィードバックをリアルタイムに行うことなく、計算量の少ない単純な方法で未知の不整地に対応できる手法が望ましいと考えられる。

以上のコンセプトに基づき当研究室では脚車輪ロボットの研究開発がなされてきた。

脚車輪ロボット Chariot II は、脚関節モータのサーボゲインを変化することで、脚部にソフト的にコンプライアンスをつくり出している。車輪と脚で自重を支え、脚と車輪を同期させて移動する。コンプライアンスは、ある程度の路面の外乱を吸収する。その特性を利用することで、脚の計画軌跡を変えることなく未知の不整地を移動できる。

3.1 姿勢揺動抑制の概念

脚車輪ロボット ChariotII は、車輪にばね機構を設け、また、4脚に一定のコンプライアンスを持たせている。脚のコンプライアンスは一定に設定されているため、立脚相と遊脚相の切り替わり時にも余分な力がかかり、脚車輪ロボットを押し上げる。さらに脚の接地点が重心に対して対称でないため、それぞれの脚の遊脚相と立脚相の切り替わり時に、周期的に姿勢が揺動する。

したがって、遊脚相の時はコンプライアンスを大きくすることで切り替わる前後に余分な力が加わらないようにし、立脚相のときにコンプライアンスを小さくすることで、周期的な姿勢揺動を抑制することができると思われる。

以下では、まず平地時におけるコンプライアンスの設定を考えた後に、平地時を基準にして段差時におけるコンプライアンスの設定を検討する。

3.2 移動の仮定

図3に示したようなクローリング歩容を考える。各脚の計画軌跡は、図4のように胴体中心から80cmの地点に接地し、50cmの地点まで動かされる。遊脚相と立脚相の切り替わり時には、脚は地面の法線方向に動かされる。

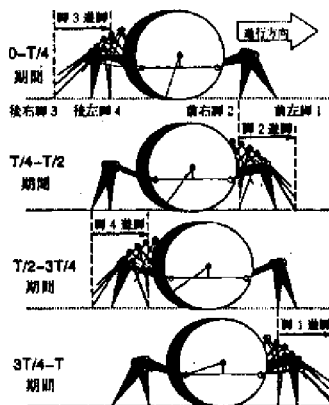


図3: クローリング歩容

3.3 平地時のコンプライアンスの設定

ここでは、この脚車輪ロボットの研究スタンスに基づき、外界に応じてリアルタイムにコンプライアンスを制御して姿勢制御することは考えないことにする。むしろ、リアルタイムに外界との

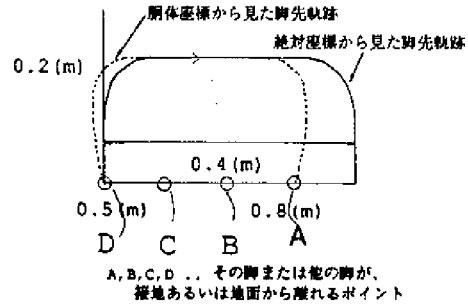


図4: 脚先軌跡

フィードバックを行うことなくどこまで姿勢揺動を抑制できるかを考える。

そこで、コンプライアンスの切り替わるタイミングは、それぞれの脚が目標軌跡である図4の底部分に切り替わるとき(点A,D)とする。つまり、それぞれの脚にとって、1サイクル中に4回コンプライアンスが変わるタイミングが存在する(点A,B,C,D)。クローリング歩容を考えているので、図5における各脚のコンプライアンスを検討し、4分の1周期ごとに、対応したコンプライアンスに変える。コンプライアンスを決定するにあたって、65mmの段差と15度の傾斜を滑べらずに登れるように脚と車輪の荷重分担率を46:54とする [8]

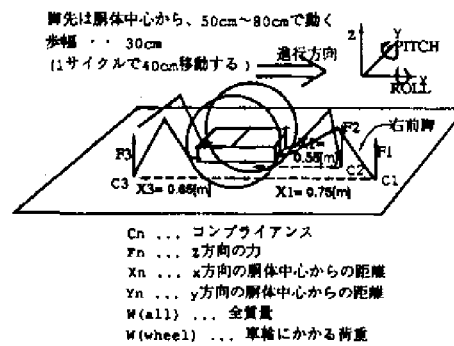


図5: コンプライアンスの設定

ある瞬間で本体の傾き0として力のつり合いを考える。

z方向の力のつりあい

$$\sum F_{leg} = gM_{all} - F_{wheel}$$

ピッチ軸回りのモーメントのつりあい

$$\sum F_{leg} X_{leg} = 0$$

ロール軸回りのモーメントのつりあい

$$\sum F_{leg} Y_{leg} = 0$$

ここで、 F_{leg} , X_{leg} はそれぞれ、図5において $F1 \sim F3$, $X1 \sim X3$ を表し、 Y_{leg} は、重心と脚先の胴体座標における y 方向の距離を表す。また、 M_{all} は質量を表し、 F_{wheel} は車輪にかかる荷重を表す。 g は重力加速度である。

上式から計算された z 方向の力 F と脚の目標位置とのずれ δ によって各脚のコンプライアンス $C_n (n=1, 2, 3)$ が求まる。脚車輪ロボット ChariotII の自立走行時 ($M_{all}=38\text{kg}$) には、 δ を 2cm とし、車輪のコンプライアンスは $1/5500(N/m)$ 、脚のコンプライアンスは $C_1=1/300(m/N)$, $C_2=1/4500(m/N)$, $C_3=1/4200(m/N)$ と求まる。例として、右前脚の1サイクル中のコンプライアンスの変化の過程を記すと、コンプライアンスは、 $C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow$ (遊脚時のコンプライアンス) の順でサイクルする (図6)。遊脚時のコンプライアンスは $1/100(m/N)$ としてシミュレーションを行った。

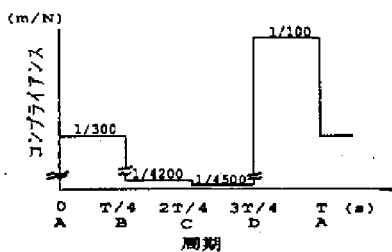


図6: コンプライアンスの変化の過程

3.4 段差時のコンプライアンスの設定

段差に脚がかかった場合を考える。平地時と同様にコンプライアンスを与えたのでは、目標位置と実際位置の差が大きいため、大きな力が発生する。この時には、かえって姿勢が大きく変化してしまう。(図7参照)。

そこで、脚の目標位置と実際位置の差 δ の大きさに応じて、コンプライアンスを変化させることを考える。ただし、図4の点A,B,C,Dで、コンプライアンスを変化させる。段差時に姿勢が変化しないようにするためには、平地のときに発生される力と同じ力が脚先に生じるようにすれば

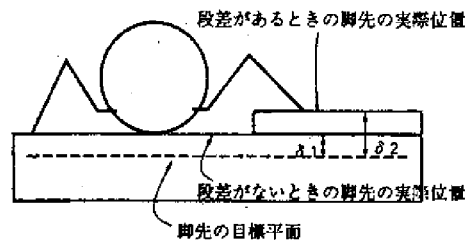


図7: 段差時の目標位置と実際位置の差

よい。例えば、図7において δ_2 が δ_1 の2倍だったとしたら、コンプライアンスは、平地時の2倍となる。

図8は、平地時と同様にコンプライアンスを与えた時と、段差に応じて変化させた場合の、段差乗り越え時の距離に対する胴体高さのシミュレーションである。また、図中の上の図は、時間に対する胴体高さを示している。段差に応じてコンプライアンスを変化させない場合は、全ての脚が段差を登り切るまで、段差に脚がつくたびに、胴体が揺れることがわかる。これに対して本報告で示したように段差に応じてコンプライアンスを変化させると、胴体の揺動は路面に沿って滑らかに変化しており、その有効性が示された。

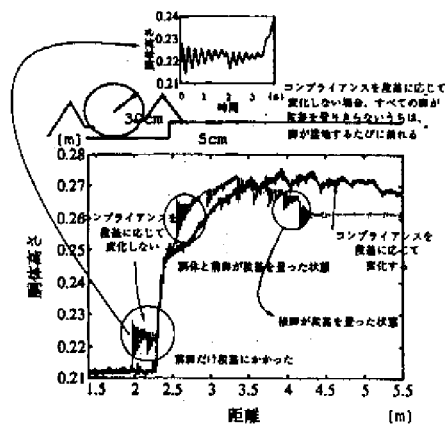


図8: 段差に応じてコンプライアンスを変化させたときの胴体の揺動

4 シミュレーションと実験

以下の実験を行う際の条件として、Chariot II は、路面の状況は全くわからないものとする。

実験は、平地、 0.04m の凸路面、 $0.05\text{m}-0.04\text{m}$ 凹路面に対して行い、より一般的な場合として、不規則凹凸路面^[10] 時のシミュレーションを行っ

た。

周期的な姿勢揺動を抑えることの評価関数としてロール角とピッチ角に対して、以下のものを考える。

$$\theta_{pave}(t) = 1/T \int_{t-T/2}^{t+T/2} \theta_p(t) dt$$

$$\theta_{rave}(t) = 1/T \int_{t-T/2}^{t+T/2} \theta_r(t) dt$$

$$Z_p = 1/n \int_0^{nT} (\theta_p(t) - \theta_{pave}(t))^2 dt$$

$$Z_r = 1/n \int_0^{nT} (\theta_r(t) - \theta_{rave}(t))^2 dt$$

ここで、 T は、1 サイクルに要する時間であり、 θ_{pave} 、 θ_{rave} は、1 サイクルに対するピッチ角、ロール角の移動平均の角度である (図 9 参考)。 n は、ある特徴的な地形 (例えば、凸路面) において、その地形が影響する範囲を脚車輪ロボットが移動するのに必要なサイクル数である。

Z_p 、 Z_r は、移動平均値との偏差の自乗を考えていることになる。

Z_p 、 Z_r の値を同図中に示した。同図中の Z_p は、コンプライアンスを4分の1周期ごとに変化させた時のものであり、 Z_{pb} は、コンプライアンス一定の時のものである。 Z_r 、 Z_{rb} も同様とする。

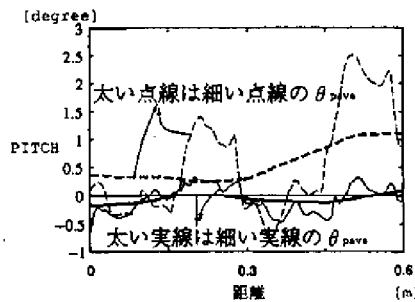


図 9: 1 サイクルに対する平均の角度

4.1 平地

平地移動時における評価関数の n は、 $n = 1$ である。

図 10,11 に、平地移動時の、距離に対するピッチ角の変化のシミュレーションと実験データを示す。また、図 12,13 には、平地移動時の距離に対するロール角の変化、図 14,15 には、その時の胴体の高さのシミュレーションと実験データを

示す。シミュレーションと実験データは、傾向が比較的よく一致していることがわかる。

次に、周期的な姿勢揺動を評価するため、コンプライアンス一定の時と変化させた時の Z_p 、 Z_r を比較する。シミュレーションにおける Z_p/Z_{pb} は 0.041、 Z_r/Z_{rb} は 0.032 であった。また、実験データにおける Z_p/Z_{pb} は 0.068、 Z_r/Z_{rb} は 0.12 であった。

Z_p/Z_{pb} 、 Z_r/Z_{rb} の値より、ロール角、ピッチ角の周期的な揺動はかなり抑えられていることがわかる。

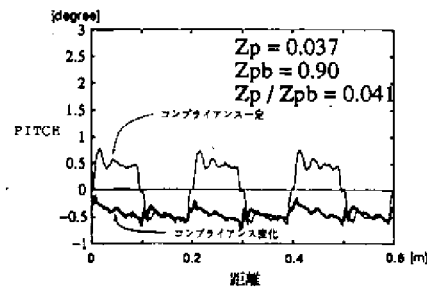


図 10: 平地移動時のピッチ角 (シミュレーション)

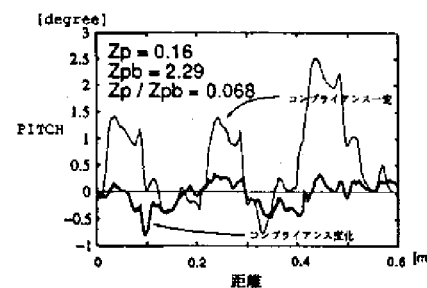


図 11: 平地移動時のピッチ角 (実験データ)

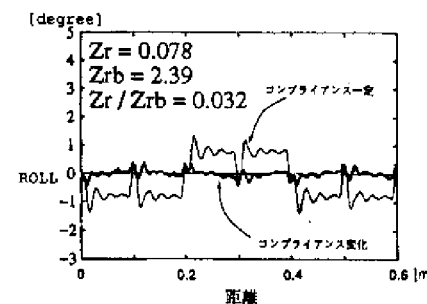


図 12: 平地移動時のロール角 (シミュレーション)

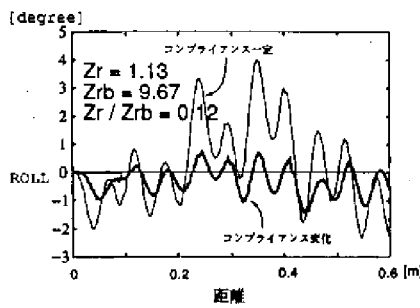


図 13: 平地移動時のロール角 (実験データ)

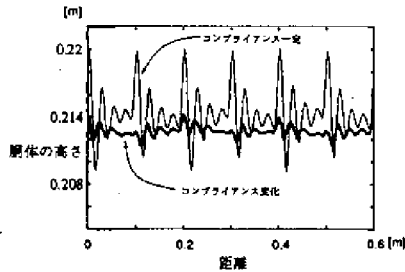


図 14: 平地移動時の胴体高さ (シミュレーション)

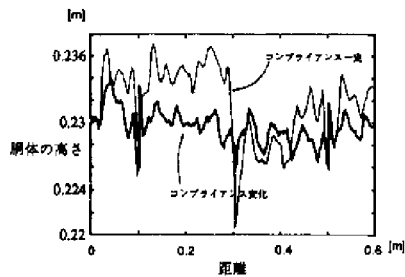


図 15: 平地移動時の胴体高さ (実験データ)

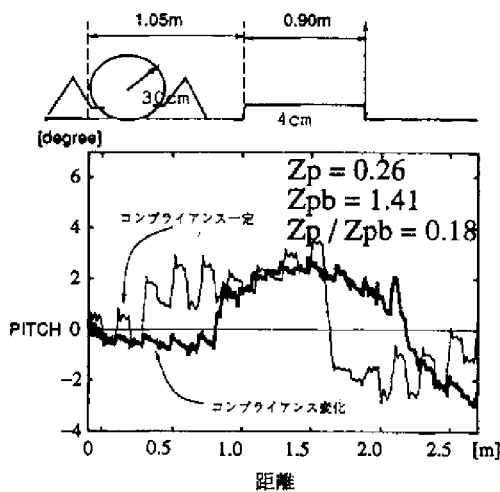


図 16: 0.04m 凸路面移動時のピッチ角 (シミュレーション)

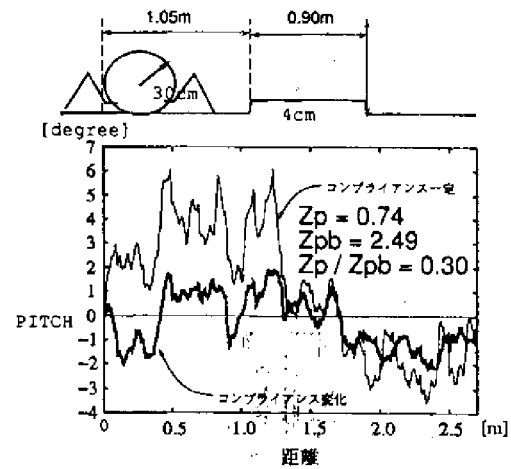


図 17: 0.04m 凸路面移動時のピッチ角 (実験データ)

4.2 0.04m 凸路面

本報告において 0.04m 凸路面移動時の n は、 $n = 7$ とする。

0.04m 凸路面移動時の、距離に対するピッチ角、ロール角、胴体高さを表すシミュレーションと実験データを図 16～図 21 に示す。また、路面の様子、 Z_p, Z_r は図中に示した。

まず、ピッチ角のシミュレーションと実験データを比較すると、コンプライアンスを変化させた時の実験データのピッチ角がシミュレーションよりも早い時期に上がっていることがわかる。これは、関節部の摩擦により、コンプライアンスが大きな遊脚相では脚先の制御がうまくできず、脚先を下ろすときに段差地面と軽い衝突が起こったためと考えられる。次に、ロール角においては、シミュレーションでは距離 2.0m 付近で大きくなっているが、実験データでは大きくなっていないことがわかる。これは、実験機ではロール角が大きくなる前に脚が滑ってしまったためと考えられる。

次に、コンプライアンス一定の時とコンプライアンスを変化させた時の周期的な姿勢揺動を比較してみる。シミュレーションにおける Z_p/Z_{pb} は 0.18、 Z_r/Z_{rb} は 0.67 であった。実験データにおける Z_p/Z_{pb} は 0.30、 Z_r/Z_{rb} は 0.26 であった。実験データの Z_r/Z_{rb} と、シミュレーションの Z_r/Z_{rb} の値の違いは、脚の滑りによるものと思われる。

以上の結果より、0.04m 凸路面移動時において

も周期的な姿勢揺動は抑えられていることが確認された。

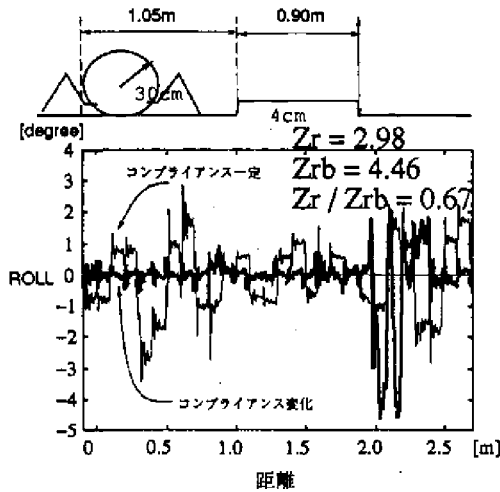


図 18: 0.04m 凸路面移動時のロール角 (シミュレーション)

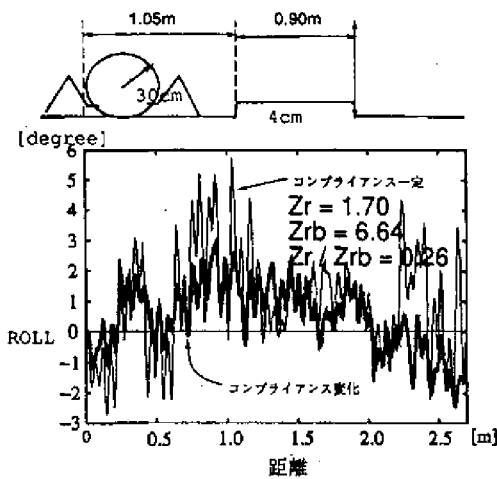


図 19: 0.04m 凸路面移動時のロール角 (実験データ)

4.3 0.05m-0.04m 凹路面

本報告において 0.05m-0.04m 凹路面移動時の n は、 $n = 9$ とする。

0.05m-0.04m 凹路面移動時の距離に対するピッチ角, ロール角, 胴体高さを表すシミュレーションと実験データを図 22~図 27 に示す。また, 路面の様子と, Z_p, Z_r は図中に示す。

この場合にもシミュレーションと実験データはよく一致していることがわかる。ただ, ピッチ角において, 実験データではシミュレーションよ

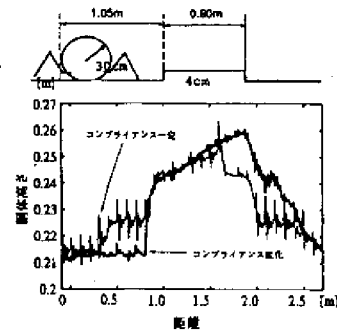


図 20: 0.04m 凸路面移動時の胴体高さ (シミュレーション)

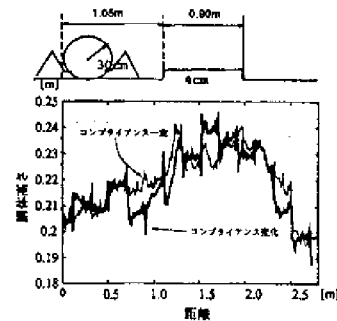


図 21: 0.04m 凸路面移動時の胴体高さ (実験データ)

り凹凸があることがわかる。これは、遊脚を下ろす時の勢いが原因で脚が地面と衝突してしまい、ピッチ角に凹凸が生じるためと考えられる。

次に、コンプライアンス一定の時とコンプライアンスを変化させた時の周期的な姿勢揺動を比較する。シミュレーションの Z_p/Z_{pb} は 0.17, Z_r/Z_{rb} は 0.041 であった。実験データの Z_p/Z_{pb} は 0.18, Z_r/Z_{rb} は 0.20 であった。

以上から 0.05m-0.04m 凹路面においても周期的な姿勢揺動は抑えられていることが確認された。

4.4 不規則凹凸路面

より一般的な路面を考える。平地, 凸路面, 凹路面のシミュレーションと実験データを比較することで, シミュレーションの妥当性が示されたと考え, 不規則凹凸路面移動時に対して, シミュレーションを行った。

不規則凹凸路面であるので, n は任意である。

図 28~図 30 に距離に対するピッチ角, ロール角, 胴体高さのシミュレーション結果を示す。路

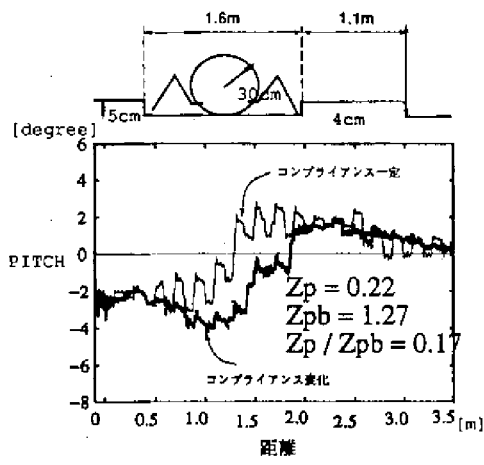


図 22: 0.05m-0.04m 凹路面移動時のピッチ角 (シミュレーション)

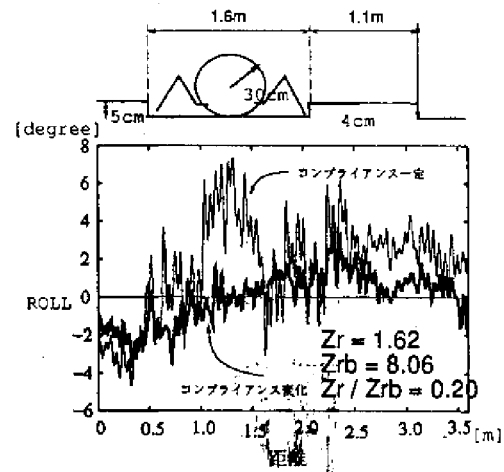


図 25: 0.05m-0.04m 凹路面移動時のロール角 (実験データ)

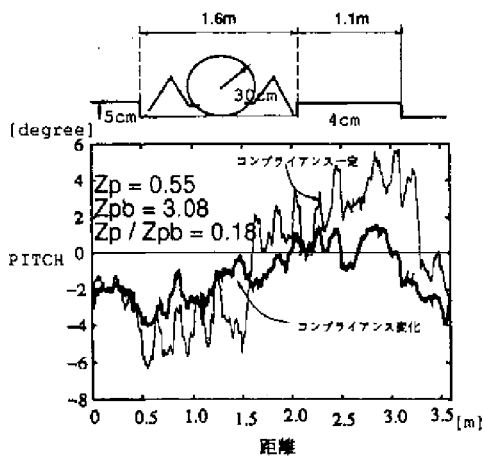


図 23: 0.05m-0.04m 凹路面移動時のピッチ角 (実験データ)

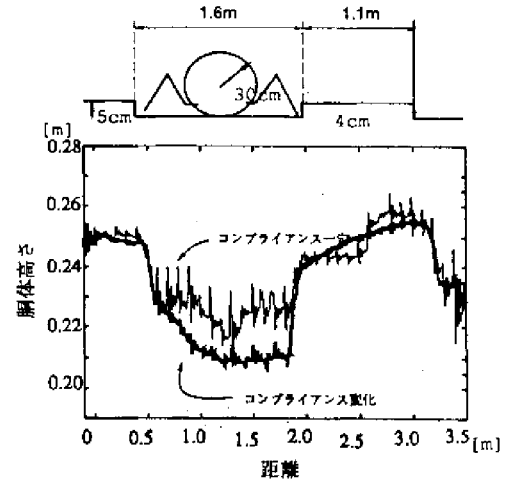


図 26: 0.05m-0.04m 凹路面移動時の胴体高さ (シミュレーション)

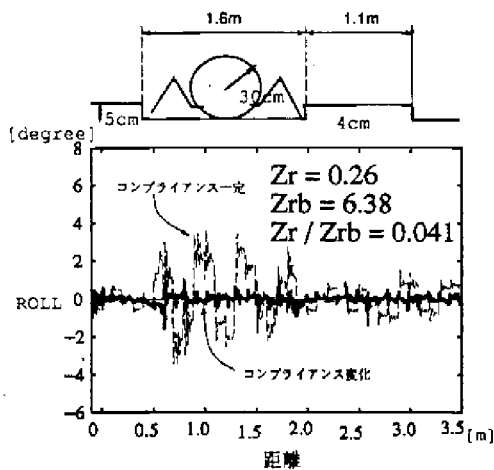


図 24: 0.05m-0.04m 凹路面移動時のロール角 (シミュレーション)

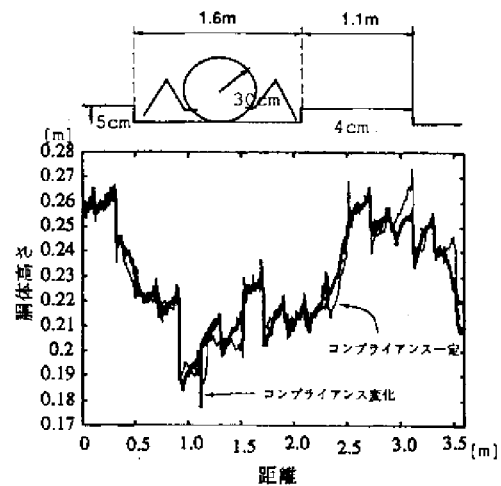


図 27: 0.05m-0.04m 凹路面移動時の胴体高さ (実験データ)

面の状況は、図 30 に示す。また、 Z_p, Z_r は、図中に示す。

Z_p/Z_{pb} は 0.53, Z_r/Z_{rb} は 0.026 であり、不規則凹凸路面に対しても周期的な姿勢揺動が抑えられていることが確認された。

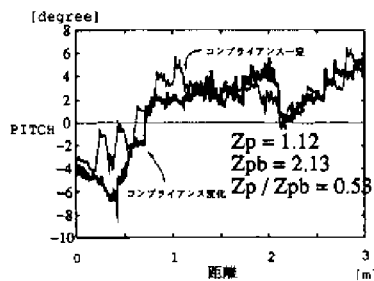


図 28: 不規則凹凸路面移動時のピッチ角(シミュレーション)

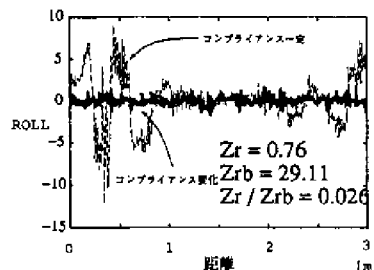


図 29: 不規則凹凸路面移動時のロール角(シミュレーション)

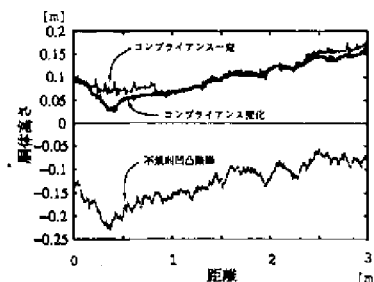


図 30: 不規則凹凸路面移動時の胴体高さ(シミュレーション)

5 まとめ

それぞれの脚において、計画軌跡における遊脚相と立脚相の切り替え時にコンプライアンスを変化させることで、脚車輪ロボットの周期的な姿勢揺動を抑制することを提案した。平地, 0.04m

凸路面, 0.05m-0.04m 凹路面移動時におけるシミュレーションと実験を行い、有効性を検証した。また、より一般的な場合として、不規則凹凸路面についてシミュレーションを行った。

以上、提案した手法により外界とのフィードバックをリアルタイムに行うことなく未知の不整地を移動する手法において生じる周期的な姿勢揺動を、そのコンセプトを崩すことなく、抑制でき、姿勢角の変化を滑らかにできることを確認した。

参考文献

- [1] 大道, 井辺. 脚車輪型移動装置の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 68-75, 1984.
- [2] 安達, 新井ほか3名. 脚とクローラを用いたハイブリッド移動機構の試作. 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 115-116, 1992.
- [3] 広瀬, 竹内. 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案. 第12回日本ロボット学術講演会予稿集, pp. 1197-1198, 1994.
- [4] 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. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 520-525, 1992.
- [5] 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, pp. 2138-2143, 1992.
- [6] 長坂, 中野. 移動ロボットにおける車輪の大きさと受動的対地適応性. 日本ロボット学会第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 67-72, 1993.
- [7] S.Nagasaka E.Nakano. Leg-wheel robot: A futuristic mobile platform for forestry industry. In *Proceeding of IEEE International Workshop on Advanced Robotics*, pp. 109-112, 1993.
- [8] Y.Dai, E.Nakano, T.Takahasi, and H.Ookubo. Cooperational motion of leg-wheel robot for an unexplored rough terrain environment. In *Proceedings of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, pp. 592-595, 1995.
- [9] Y.Dai, E.Nakano, T.Takahasi, and H.Ookubo. Motion control of leg-wheel robot for an unexplored rough terrain environment. In *ICAR'95*, Vol. 2, pp. 911-916, 1995.
- [10] 白井, 谷, 白井, 堀内. 不規則凹凸路面の二次元的統計的モデル化の一方法. 日本機械学会論文集(C編), Vol. 56, No. 526, pp. 64-69, 1990.