

脚車輪型移動ロボットの移動速度と 操作追従性能向上のための歩容制御

A gait control that improves the velocity and the ability to execute operation for Leg-Wheel Mobile Robot

○岩渕真也, 熊谷正俊, 庄司道彦, 高橋隆行, 中野栄二

○Shin'ya Iwabuchi, Masatoshi Kumagai, Michihiko Shoji
Takayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 脚車輪型移動ロボット(Leg-Wheel Mobile Robot), 予測型イベントドリブン歩容(Predictive Event Driven Gait), 移動速度向上(Improvement of Velocity), 安定性の予測(Stability Prediction)

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) 岩渕真也, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: iwabuchi@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 屋外作業の機械化が進み, 土木・建設分野では大小さまざまな作業機械が稼働し, 省力化に役立っている。しかし, 山間部における小規模な工事現場, あるいは林業分野などでは, その作業の多くを未だ人手に依存しているのが現状である。

山間部における機械化が進展しない主たる理由としては, 現用の作業機械で用いられる車輪機構・クローラ機構の移動能力の不足が挙げられる。しかし, このような不整地における作業の機械化は古くから望まれていることであり, この問題に対しては何かの解決を図る必要がある。

このような現状を打破するために中野らによって開発されたのが, 脚車輪型移動ロボット(Leg-Wheel Mobile Robot:LWMR)である^{1, 2)}(Fig. 1)。脚車輪

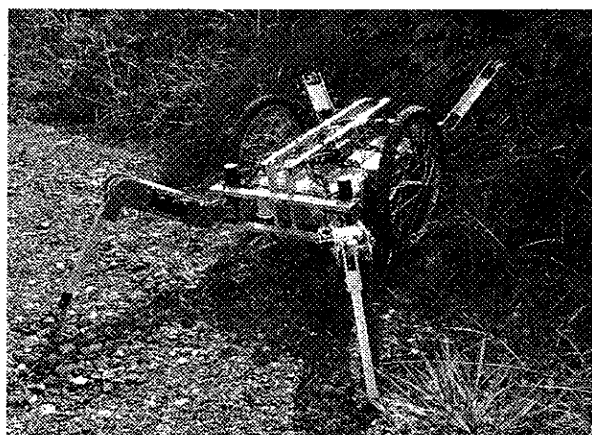


Fig. 1 Leg-Wheel Mobile Robot : Chariot III

型移動ロボットは脚機構, 車輪機構を独立に有し, 脚機構を使用している状態でも車輪機構により機体を支持する事が可能であるために, 安定性, 不整地適応性が高く, エネルギー効率にも優れている。

また制御面においては、車輪機構との併用による安定性の向上により、脚機構の制御に要求される地形情報の精確性が緩和される。実際、脚機構および車輪機構をコンプライアンス制御することで地面の凹凸を吸収し、脚姿勢の変位量から接地反力を推定することで、地形の事前センシングを必要とすることなく、未知屋外不整地の移動が可能であることが確認されている（脚車輪パッシブコンプライアンス移動方式^{3, 4, 5, 6)}）。

しかし、これは直進動作においてのみ実証がなされた基礎段階の研究であり、より実用的なものとするためには、何らかの平面移動歩容と組み合わせた上で、アルゴリズムの拡張と検証を進めていく必要があるとされていた。また、近い将来における不整地移動ロボットの実用化を現在のセンシング・制御技術の延長線上に想定した場合、屋外産業における作業の複雑さ、その実施に求められる信頼性の高さから、制御方式としては完全な自律制御よりもオペレータによる操縦を組み合わせた半自律制御（操縦型制御）のほうが実現性が高いと考えられる。そのため実用化を目指す上では、オペレータによる操縦入力をどのように機体の推進動作に変換するか、という点に関しても検討する必要がある。

これらの要求を満たす歩容として、中野・熊谷らは予測型イベントドリブン歩容を提案し、オペレータの速度指令に対して高い追従性をもつ継続的な移動を実現した⁷⁾。また、この歩容は実機によってもその有効性を確認されている。しかし、この予測型イベントドリブン歩容は遊脚本数を1本とするクリープ歩容を採用しているために、移動速度に限界が生じるという問題があることも現在までに分かっている。

そこで本研究では、この脚車輪型移動ロボットの移動速度を向上させることを考える。ただし対象とする地形を不整地としているので、速度が大きくなっても静的安定を保つ必要がある。具体的に

は脚車輪型移動ロボット特有の安定性の高さを利用して遊脚本数を2本に増やして移動速度の向上を実現する。

さらに本研究では脚が可動限界に到達するという問題を、従来通り予測型イベントドリブン歩容で回避することとし、遊脚2本のときに対応できるように、その歩容の拡張を行う。その後、遊脚を増やしたことで新たに発生する、安定性の低下という問題の対処について考え、静的安定を保ちつつ移動速度の向上を実現する。

2. 予測型イベントドリブン歩容

2.1 アルゴリズムの詳細

ここではまず、予測型イベントドリブン歩容について説明する。本歩容では、可動限界到達時間と復帰動作完了時間という2つの指標を定義し、その比較により脚の動作を生成する。両指標はそれぞれ脚の可動限界到達ならびに復帰動作の完了に要する時間の予測値である。

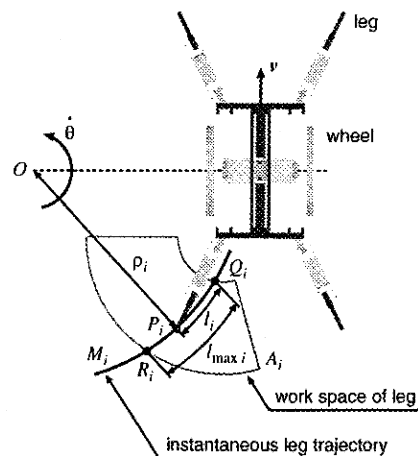


Fig. 2 Notation used for the proposed gait algorithm

Fig.2はある瞬間のロボットの運動をモデル化したものである。このモデルは旋回動作を表しており、ロボット本体の並進速度 v 、角速度 $\dot{\theta}$ に対して、運動の瞬間中心は O である。脚先は滑らずに運動

しているものとする、本体に対する脚先の瞬間的な運動は O を中心とする円軌道 M_i に沿ったものとなる。この軌道を瞬間脚先軌道と呼ぶことにする。直進動作の場合は、瞬間脚先軌道は直線である。脚のフルストロークは、Fig.2に扇形の領域 A_i で示した脚可動領域で瞬間脚先軌道を切り取った弧もしくは線分の長さ $l_{\max i}$ である。この切り取られた瞬間脚先軌道を、瞬間フルストロークと呼ぶことにする。そして瞬間フルストローク上での脚先の位置を、その進行方向の端点 Q_i から脚先接地点 P_i までの長さ l_i で表す。脚先の速度は本体速度 v 、 $\dot{\theta}$ および旋回半径 ρ_i に対し、

$$l_i = \begin{cases} |v| & (\text{straight movement}) \\ \rho_i |\dot{\theta}| & (\text{rotating movement}) \end{cases} \quad (1)$$

と表される。本体および脚がこのままの速度で運動を続けるものと仮定すると、脚 i が可動限界上の点 R_i に到達するまでの時間は

$$t_{mi} = \frac{l_{\max i} - l_i}{\dot{l}_i} \quad (2)$$

と表され、これが可動限界到達時間の定義である。

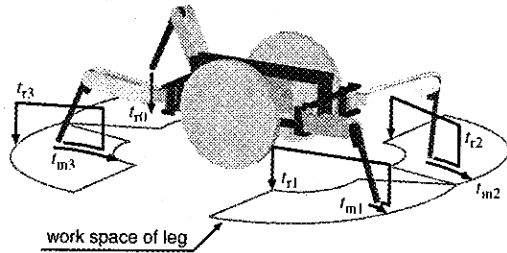


Fig. 3 An example model of the robot and gait parameters

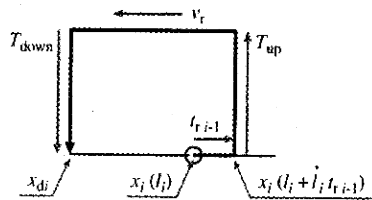


Fig. 4 The calculating model of returning time

次に、脚 i の復帰動作の完了に要する時間を考える。 l_i を媒介変数として脚先の平面座標を $x_i(l_i)$ と表し、復帰動作の完了時点での目標接地点を x_{di} とする。脚が $x_i(l_i)$ から直ちに復帰動作を開始し、遊脚相の水平動作においては x_{di} まで直線的に移動するものとして、 x_{di} にて復帰動作を完了するまでに要する時間 t_{ri} は

$$t_{ri} = T_{up} + \frac{|x_{di} - x_i(l_i)|}{v_r} + T_{down} \quad (3)$$

と表される。ここで、 T_{up} 、 T_{down} はそれぞれ脚上げ、脚下げ動作に要する時間である。これらは脚車輪パッシブ移動方式の側で想定される凹凸規模に応じて設定される値であるため、本歩容アルゴリズムの側では定数として扱う。 v_r は遊脚相での脚先の水平移動速度であり、脚の有効可動範囲内においては一定値と仮定している。

さて、式(3)はある瞬間の脚先位置 $x_i(l_i)$ から x_{di} への復帰動作に要する時間を表しているが、実際には遊脚数の制限があるため、 $x_i(l_i)$ から直ちに復帰動作を開始できるとは限らない。従来の予測型イベントドリブン歩容ではクリープ歩容を仮定しており、その遊脚数はたかだか1であるため、ある立脚を復帰動作に入れるには、既存の遊脚ならびに可動限界により近い立脚の復帰動作の完了を待たなくてはならない。そこで、復帰動作の完了に要する時間を、この待ち時間を考慮した上であらためて考えてみる。脚番号 i を可動限界到達までの時間的余裕が小さい順にFig.3のように1,2,...と割り振る。すると、機体の移動速度が変化しないという仮定の下では、脚 $i-1$ の復帰動作に要する時間 t_{ri-1} の間に脚 i は $l_i t_{ri-1}$ だけ瞬間脚先軌道上を移動することになる。よって、ある瞬間から復帰動作の完了までに脚 i はFig.4のような軌道を描くことになり、復帰動作の完了に要する時間は

$$t_{ri} = t_{ri-1} + T_{up} + \frac{|x_{di} - x_i(l_i + l_i t_{ri-1})|}{v_r} + T_{down} \quad (4)$$

という漸化式で表されることになる。これが復帰

動作完了時間の定義であり、全脚支持期間が無いとした場合に各脚の復帰動作の完了に要する時間の予測値を示す。 t_{r1} の計算に用いる t_{r0} は、立脚1が復帰動作を開始可能な状態になるまでの時間であり、遊脚がある場合にはその立脚化に必要な最短時間

$$t_{down} = \frac{h_i}{v_{down}} \quad (5)$$

がこれに相当する。ここで、 h_i は脚先高さ、 v_{down} は脚下げ時の鉛直方向脚先速度である。 t_{r0} の定義は、可動限界への過度な接近を防ぐためのマージン t_{cr} を t_{down} に付加し、

$$t_{r0} = \begin{cases} t_{cr} & (\text{no returning leg}) \\ t_{down} + t_{cr} & (\text{with returning leg}) \end{cases} \quad (6)$$

と表される。

立脚の可動限界到達を避けるためには、ある立脚の可動限界到達というイベントの発生に先行して、時間的により可動限界近傍にある立脚の復帰動作が完了していなくてはならない。それを可能とする条件は、上述の可動限界到達時間 t_{mi} と復帰動作完了時間 t_{ri} を用いて

$$t_{mi} > t_{ri-1} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

と表される。脚の復帰動作はこの条件が常に成立するように実施する必要がある。そこで、立脚の復帰動作開始タイミングは、いずれかの脚について

$$t_{mi} \leq t_{ri-1} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

が成立した時点とする。復帰動作の対象となるのは、可動限界到達時間が最小の立脚——脚番号の最も小さな立脚である。他に遊脚がない場合には復帰動作は直ちに開始され、他に遊脚が存在する場合にはそれを立脚化した上で、復帰動作を行う。

以上に述べた演算とその結果の比較は、常に新しい情報に基づいた予測処理を行うために、脚の動作周期に比べて十分短い周期で実行する。

2.2 実機への適用

以上が遊脚1本のクリープ歩容を想定した従来の予測型イベントドリブン歩容のアルゴリズムである。すなわち予測型イベントドリブン歩容とは脚の可動限界到達を事前に回避することで、継続的な推進動作を実現する歩容である。

しかしながらこの歩容単独での使用は不完全である。たとえば機体の性能を上回る程の大きな速度指令が入力されたときには、遊脚の復帰動作が機体の推進動作に追い付かず推進動作は断続的なものとなる。そこで、このような場合に対処するため、本体に入力する速度を制限する手法(速度制限手法)も同時に考えられている⁷⁾。この手法は現在の機体が出し得る最高速度を推定するものであり、この手法と組み合わせて用いることで予測型イベントドリブン歩容は初めて完全なものとなる。

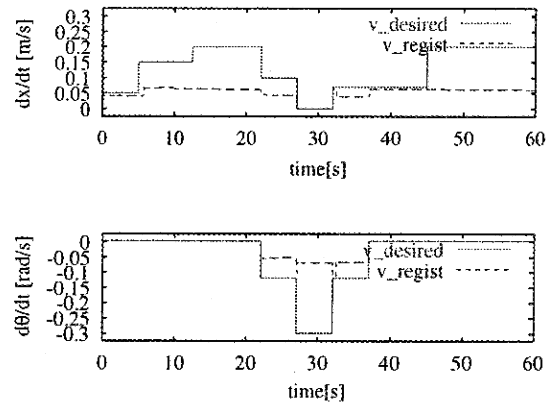


Fig. 5 Desired and limited velocity(1 returning leg)

この歩容アルゴリズムを用いて機体にFig.5の実線のような速度指令を与えたときの本体の移動実験を行った。機体座標軸の向きは、Fig.6のとおりである。この実験の結果、速度制限手法によって機体に入力された制限速度はFig.5の破線で表され、本体の移動軌跡はFig.6であった。

速度制限手法で算出された制限速度は、現在の機体性能(遊脚1本)での最高速度である。Fig.5を見

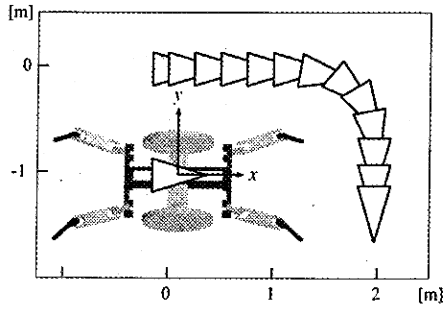


Fig. 6 Position and direction of the robot in the experiment

ると分かるとおり、遊脚1本のクリープ歩容を前提とする限り、これ以上の速度を出すことはできない。そこで遊脚を2本とすることで、さらなる速度の向上を目指すこととする。

2.3 遊脚2本の条件下でのアルゴリズム

本体の移動速度を向上させるために遊脚を増やす必要があることは前小節に述べたとおりである。ここでは、まず遊脚が1本の場合と2本の場合の相違点について述べる。

遊脚1本のときは、ある脚の可動限界到達というイベントの発生に先行して、時間的により可動限界近傍にある立脚の復帰完了動作が完了している必要があった。しかし遊脚2本の場合には、その条件は緩和される。なぜなら、遊脚を2本としたことにより、イベントの対象になっている脚の直前の脚の復帰動作は必ずしも完了する必要があるためである。遊脚2本の場合に継続的な推進動作を行うには、脚番号が2つ離れている脚の復帰動作の完了が必要となる。

この点を考慮すると2.1節で使用された式のうち、いくつかは若干の変更の必要が生ずる。まず脚の復帰動作の完了に要する時間の漸化式(4)は、

$$t_{ri} = t_{ri-2} + T_{up} + \frac{|x_{di} - x_i(l_i + l_i t_{ri-2})|}{v_r} + T_{down} \quad (9)$$

で表される。またこの式を計算する際、遊脚2本の

場合には t_{r2} の計算に用いる t_{r0} と共に、 t_{r1} の計算に用いる $t_{r(-1)}$ も定義することが必要となる。ここで t_{r0} , $t_{r(-1)}$ の定義式は、式(6)を変更する形で

$$t_{r0} = \begin{cases} t_{cr} & \text{(no returning leg)} \\ t_{cr} & \text{(1 returning leg)} \\ t_{down} + t_{cr} & \text{(2 returning leg)} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{r(-1)} = \begin{cases} t_{cr} & \text{(no returning leg)} \\ t_{down} + t_{cr} & \text{(1 returning leg)} \\ t_{down} + t_{cr} & \text{(2 returning leg)} \end{cases} \quad (11)$$

として表される。また前述したように、ある立脚の可動限界到達を避けるには、脚番号が2つ離れている立脚の復帰動作が完了していればよい。これを可能とする条件は上述の可動限界到達時間 t_{mi} と復帰動作完了時間 t_{ri} を用いて

$$t_{mi} > t_{ri-2} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (12)$$

と表される。同様に立脚の復帰動作開始タイミングは、いずれかの脚について

$$t_{mi} \leq t_{ri-2} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

が成立した時点とする。これは遊脚が1本のときの式(8)に対応するものである。

2.4 シミュレーション

前小節に述べた遊脚2本のときのアルゴリズムをシミュレーションによって検証する。本体に与える速度指令は2.2節の実験のときに与えた速度指令と同一のものであり、このときの目標速度と制限速度の時間変化を示したのがFig.7である。このFig.7と遊脚1本のときの実験結果であるFig.5とを比較すれば、移動速度の大きな移動を実現できることが確認できる。

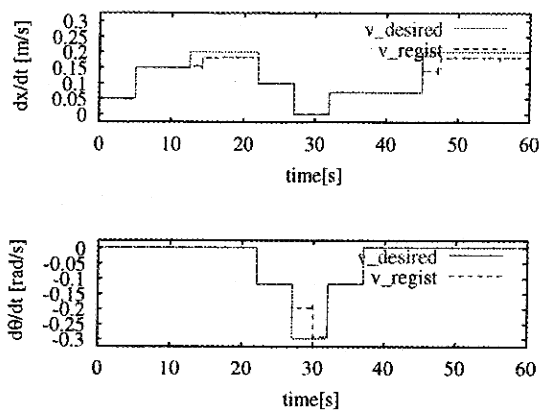


Fig. 7 Desired and limited velocity(2 returning leg)

3. 安定性低下の問題

3.1 安定性考慮の必要性

前節において、予測型イベントドリブン歩容に最大遊脚本数2本の条件を付加することで、従来よりも大きな本体速度で継続的な推進動作が可能となることが確認できた。しかし遊脚本数を増やしたために、後述する本体の安定性が低下するという新たな問題が生ずる。そこで今後安定性の議論を進めていく都合上、安定性の指標を導入し、予測型イベントドリブン歩容の安定性について論じる。

3.2 安定性指標の導入

不整地での安定性の指標として、Messuri, Kleinらによって提案されたエネルギー安定余裕がある⁸⁾。エネルギー安定余裕とは、「歩行機械の支持脚のうち任意の二つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずると考えた際、転倒の過程で重心が持ち上げられる位置エネルギーの大きさによって安定性を評価するもの」である。安定性の評価基準自体は数多くあるが、エネルギー安定余裕は不整地における安定性の指標として優れていることが、広瀬・塚越らによって示されており⁹⁾、本研究でもこの指標を用いることとする。

ただし脚車輪分離型ロボットは、重心が車軸よりも下にあるときは本質的に安定な状態にあり、この議論をそのまま適用することはできない。しかし、今回は脚車輪分離型ロボットが搬送作業を行う際に負うと予想される可搬重量を考慮して、重心が高い位置にあるとして議論をすすめる。

3.3 エネルギー安定余裕の計算

今、機体の中心に重心がある場合を考え、前脚2本と後脚2本とが一組となって動くことを考える。この状態で遊脚2本の予測型イベントドリブン歩容を行ったときのエネルギー安定余裕の時間変化をFig.8に示す。歩行開始時の4脚支持のときの値が100[Nm]と高く、支持点が少なくなるにつれ、その値が低下する。また3脚支持のときのエネルギー安定余裕には値が2種類ある。これは後脚が復帰する場合には、脚先が本体重心に近付き支持多角形が小さくなるために値が低くなり、逆に前脚が復帰する場合には、脚先が本体中心から遠ざかり支持多角形が大きくなるために値が高くなるのである。さらに前脚2本、後脚2本が同時に上がる2脚支持の場合のエネルギー安定余裕の値は著しく小さく、0[Nm]付近になっていることがわかる。このとき機体姿勢は大きく傾き転倒を開始している。

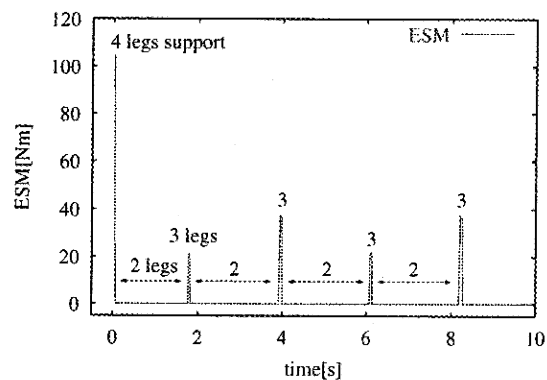


Fig. 8 Energy Stability Margin(no stability prediction)

このような0[Nm]という著しく安定性の低い状

態を回避するには、脚の復帰動作を行うタイミングを「脚の可動限界への到達」だけとしている従来の方法では不十分であり、「安定性の低下」を考慮した、復帰動作タイミングの積極的な制御が必要となる。さらに本研究の目的の一つである継続的な推進動作をも実現することを考えると「安定性の予測」が不可欠となる。そこで次にこの安定性の予測について考えることとする。

3.4 安定性の予測

安定性を予測する際のフローチャートはFig.9で表される。このチャートで重要となる図の記号のある箇所について以下で解説を行う。

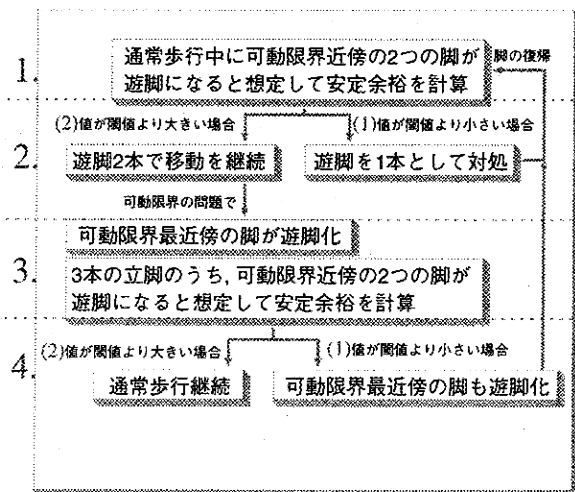


Fig. 9 Flow Chart

1. 安定余裕の計算

まず始めに、可動限界近傍の2つの脚が遊脚になったと仮定し、そのときに作られる支持多角形のもとでエネルギー安定余裕を計算する。これは将来的な脚配置を予想して安定性について予測を行うための操作である。また、ここでは計算した安定余裕の値と閾値との比較を行い、その結果によって2.-(1)もしくは2.-(2)に移ることになる。

ここでの閾値はオペレータが設定できる。速度の大きさを重視した移動を望む場合には値を低く、

速度よりも安定性を重視した移動を望む場合には値を高くとればよい。

2. 安定余裕の値による場合分け(I)

(1) 遊脚を1本として対処

1.で計算したエネルギー安定余裕が閾値よりも小さい場合である。このときは可動限界最近傍の脚が復帰しおわらない限り、2番目に可動限界に近い脚は安定性維持のため復帰することができない。つまり従来の遊脚本数を1本とした予測型イベントドリブン歩容と等しい歩容をすることになる。

このループ2.-(1)は可動限界最近傍の脚が復帰した時点で1.に戻る。

(2) 遊脚を2本として移動を継続

1.で計算したエネルギー安定余裕が閾値よりも大きい場合である。このとき本体は遊脚本数を2本として移動を行うことが可能である。この状態で移動を継続していくと最終的には、予測型イベントドリブン歩容のアルゴリズムにより可動限界最近傍の脚が遊脚化を開始し3.へと移る。

3. (可動限界最近傍の脚が遊脚のときの)

安定余裕の計算

今遊脚となったばかりの脚が復帰しおわってから、とると予想される脚配置を予測して安定余裕を計算する。この値と閾値の比較を行い、その結果によって4.-(1)もしくは4.-(2)に移ることになる。

4. 安定余裕の値による場合分け(II)

(1) 可動限界最近傍の脚も遊脚化

3.で計算したエネルギー安定余裕が閾値よりも小さい場合である。このとき将来的に安定性が低くなることが分かっているので、3本の立脚のうち最も可動限界に近い脚を遊脚にして復帰動作に入らせる。このとき遊脚は2本の状態となる。この脚が復帰しおわればループ4.-(1)は1.に戻る。

(2) 通常歩行の継続

3.で計算したエネルギー安定余裕が閾値よりも大きい場合である。このとき本体は安定に移動することができ、通常歩行を継続することになる。遊脚2本で動く場合には最終的に、ここに収束する。

3.5 実機への適用

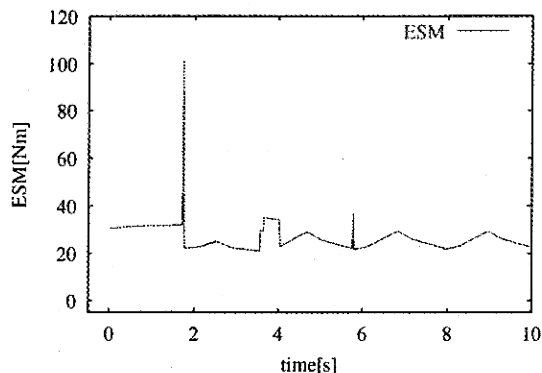


Fig. 10 Energy Stability Margin(with stability prediction)

3.3節のFig.8の状態にある歩行機械に、上述した安定性の予測を用いた結果がFig.10である。エネルギー安定余裕が小さい状態を回避した移動ができることが確認できる。

4. おわりに

本研究では、従来の予測型イベントドリブン歩容において最大遊脚本数を2本とすることで本体の移動速度を向上させた。また、その際に問題となる安定性の低下に関しても、安定性を予測することによって、望ましくない脚配置を回避するような移動を可能とした。

今後は、安定性予測の考え方を平面移動に拡張し、平面移動の際にも移動速度が大きく、安定性を保った歩行を実現させる予定である。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 中野栄二: 走行ロボットの走行制御装置, 特願平7-289966 (1995)
- 4) Yu-Jie Dai, Eiji Nakano, Takayuki Takahashi, Hiroki Ookubo: Cooperative 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)
- 5) 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)
- 6) 中嶋, 中野, 大久保, 高橋, 戴: 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, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.219-220, 1996.
- 7) 熊谷, 高橋, 王, 中野: 予測型イベントドリブン歩容による脚車輪分離型ロボットの継続的推進動作 日本ロボット学会, Vol.19, No.6, 775/783 (2001)
- 8) 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)
- 9) 広瀬, 塚越, 米田: 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準, 日本ロボット学会, vol. 16, No.8, 1076/1082 (1998)