

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

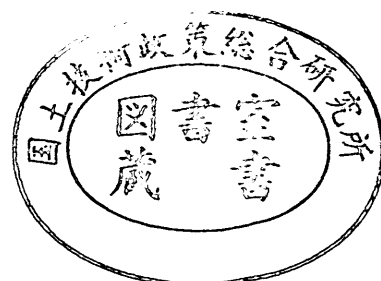
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 37

NO. 2

June 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第37巻 第2号 (Vol. 37, No. 2), 1998年6月 (June 1998)

目 次 (CONTENTS)

着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動北詰昌樹・山本浩司	3
Stability of group column type DMM groundMasaki KITAZUME, Hiroshi YAMAMOTO	
ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果菊池喜昭・新舎 博・江口信也	29
Effects of the back-filling to the stability of a caissonYoshiaki KIKUCHI, Hiroshi SHINSHA, Shin-ya EGUCHI	
大阪湾洪積粘土の三軸せん断特性と大型護岸構造物の安定性渡部要一・土田 孝・足立格一郎	59
Undrained Shear Strength of Osaka Pleistocene Clay And Stability of Large Scale Seawall StructureYoichi WATABE, Takashi TSUCHIDA, Kakuichiro ADACHI	
鋼管杭式棧橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察横田 弘・竹鼻直人・南 兼一郎・高橋邦夫・川端規之	75
Consideration of Design Seismic Coefficients of An Open Type Wharf Based on Dynamic Response AnalysesHiroshi YOKOTA, Naoto TAKEHANA, Ken'ichiro MINAMI, Kunio TAKAHASHI, Noriyuki KAWABATA	
信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第3報) ーレベル1, 2の設計法の適用性総括ー長尾 毅・大久保昇・川崎 進・林由木夫	131
Evaluation of Safety of Breakwaters by the Reliability Based Design Method (3rd Report: Concluding the Applicability of Reliability Based Design Method)Takashi NAGAO, Noboru OKUBO, Susumu KAWASAKI, Yukio HAYASHI	
棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計長尾 毅・横田 弘・竹地晃一郎・川崎 進・大久保昇	177
Fatigue Limit State Design Method for Superstructures of Open Type Wharves in view of Cargo Handling Machine LoadsTakashi NAGAO, Hiroshi YOKOTA, Koichiro TAKECHI, Susumu KAWASAKI, Noboru OKUBO	

水中レーザー視認装置による画像化実験

……秋園純一・佐藤栄治・田中敏成・高橋義明・朝妻春和・小林 健・斎藤利貴 ……221

Imaging Experiments of Underwater Laser Viewing System

……Jun'ichi AKIZONO, Eiji SATO, Toshinari TANAKA, Yoshiaki TAKAHASHI,
Harukazu ASATSUMA, Takeshi KOBAYASHI, Toshitaka SAITO

歩行式水中調査ロボットの開発

－（第4報）歩容及び軌道の実時間計画法－

……田中敏成・秋園純一・高橋英俊・佐藤栄治・鈴木健治・米田 完・
金山 裕・Robert B. McGhee・竹内俱佳 ……259

Development of Aquatic walking Robot for Underwater Inspection

－（The 4th report）A Method of Real-time Gait, Trajectory and Path Planning－

……Toshinari TANAKA, Jun'ich AKIZONO, Hidetoshi TAKAHASHI, Eiji SATO, Kenji SUZUKI,
Kan YONEDA, Yutaka KANAYAMA, Robert B. McGhee, Tomoyoshi TAKEUCHI

歩行式水中調査ロボットの開発 — (第4報) 歩容及び軌道の実時間計画法 —

田中敏成^{*}・秋園純一^{**}・高橋英俊^{***}・佐藤栄治^{****}・鈴木健治^{*****}
米田 完^{*****}・金山 裕^{*****}・Robert B. McGhee^{*****}・竹内俱佳^{*****}

要 旨

海洋土木工事の作業現場のほとんどは海中であるため、そこは視認性と作業状況の把握の困難さ、波浪と潮流、腐食や圧力など様々な悪条件が重なって、自動化・ロボット化の難しい分野であることは否めない。結果として、その劣悪な環境下における労力の主は未だ潜水士であり、作業者の労苦からの解放、作業現場の大水深化及び将来の人手不足への対応という観点からも、自動化・ロボット化が望まれる。

これまで当研究室では、水中調査ロボット「アクアロボ」の研究及び開発を行い、3機の実験機の開発及び計5回の実海域実験から良好な結果を得た。しかしながら、間欠トライポッド歩容による直進及びその場回転の組合せという単調な歩行アルゴリズムを用いていたため、ロボットの歩行速度及び行動計画の自由度はそれほど高いものではなかった。ここで実用に供し得る作業効率を得るためには、歩行性能のさらなる向上が求められる。

本研究では、連続かつ全方向的な胴体運動を実現する新たな歩容を導出し、動的に接地脚数及び脚先の予測着地点を決定する歩行アルゴリズムを提案することで、歩行速度、安定性、対地適応性を含めた歩行性能全体の向上を図った。

キーワード：水中調査，歩行ロボット，軸対称脚配列，全方向運動，拡張ウェーブ歩容，MML，
脚先軌道生成

* 機械技術部ロボティクス研究室

〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

Tel:0468-44-5042;Fax:0468-44-0575;E-mail:tanaka_t@cc.phri.go.jp

** 機械技術部 ロボティクス研究室長

*** 機械技術部 前ロボティクス研究室長 (現 (財) 国際臨海開発研究センター)

**** 電気通信大学 (現三菱重工業 (株))

***** 東京工業大学

***** Naval Postgraduate School, U.S.A.

***** 電気通信大学

Development of Aquatic walking Robot for Underwater Inspection – (The 4th report) A Method of Real-time Gait, Trajectory and Path Planning –

Toshinari TANAKA*
Jun'ich AKIZONO**
Hidetoshi TAKAHASHI***
Eiji SATO*
Kenji SUZUKI****
Kan YONEDA*****
Yutaka KANAYAMA*****
Robert B. McGhee*****
Tomoyoshi TAKEUCHI*****

Synopsis

As the most of port construction sites are in the sea, there are influenced muddy sea water, waves and tidal current, corrosion and pressure. Therefore it is a difficult place for automatization/robotization and labor force in the bad and severe environment are still mainly human divers. And the automatization/robotization of the construction sites are hoped because of release workers from distress labor, expansion to offshore of the construction sites, and correspondence to future shortage of labor.

We obtained the fine result through the research and development of underwater inspection robot "Aqarobot" and we have carried out total 5 times of field tests using experimental model. However, the walking speed and the flexibility of making an action planning of the robots were not so high because we were using a simple walking algorithm "intermittent tripod gait algorithm" that is based on combination of going straight and rotation. It is necessary to improve walking performance because obtain the practical working efficiency.

In this research, we examined about new gait algorithm "expanded wave gait algorithm" that is able to move the body continuously and in any direction. And we proposed walking algorithm that support leg number and predicted foothold are decided dynamically and we intended the improvement of all the walk performance including walk speed, stability and adaptability to surface.

Key words : Underwater Inspection, Walking robot, Axially symmetric, Omni-direction,
Expanded wave gait, MML, Transfer foot trajectory planning

* Member of Robotics Laboratory, Machinery Division

1-1, 3-chome, Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826, Japan

Tel:+81-468-44-5042;Fax:+81-468-44-0575;E-mail:tanaka_t@cc.phri.go.jp

** Chief of Robotics Laboratory, Machinery Division

*** Former Chief of Robotics Laboratory, Machinery Division(Overseas Coastal Area Development Institute of Japan at present)

**** The University of Electoro-Communications(Mitsubishi Heavy Industries at present)

***** Tokyo Institute of Technology

***** Naval Postgraduate School, U.S.A.

***** The University of Electoro-Communications

目 次

要 旨	259
1. まえがき	263
2. ロボットのモデル	263
2. 1 アクアロボの順逆運動学	263
2. 2 アクアロボの順逆ヤコビ行列	267
2. 3 世界座標系から胴体座標系への変換行列	267
2. 4 可動範囲の制限	268
3. 胴体軌道の生成	270
3. 1 胴体の運動	270
3. 2 2次元空間の運動	270
3. 3 胴体高さや姿勢の制御	271
4. 歩容アルゴリズム	273
4. 1 周期歩容のパラメータ計算	273
4. 2 ウェーブ歩容	274
4. 3 拡張ウェーブ歩容	274
4. 4 拡張ウェーブ歩容アルゴリズムのシミュレーション	283
5. 脚先軌道の生成	283
5. 1 遊脚相	283
5. 2 支持脚相	288
5. 3 脚先軌道生成法のシミュレーション	289
6. 歩行実験	289
6. 1 アクアロボ制御システム	289
6. 2 アクアロボ1号機（陸上実験機）による歩行実験	291
7. 結 論	292
8. あとがき	292
謝 辞	292
参考文献	292
記号表	293

1. まえがき

土木工事は元来様々な自然環境をその対象とするものである。そして、その規模の大きさと作業条件の過酷さから、早期よりその機械化が推し進められてきた分野である。しかしながら、それらの作業機械は個々の作業条件に合わせた仕様であるため、自動化・ロボット化が難しい分野であることは否めない。特に、海洋土木工事の作業現場のほとんどは海中であるため、視認性と作業状況の把握の困難さ、波浪と潮流、防水性、流体抵抗、腐食や圧力など様々な悪条件が重なって、自動化・ロボット化を陸上土木工事に比べてさらに困難なものとしている。よってその劣悪な環境下における労力の主は未だ潜水士であり、作業者の労苦からの解放、作業現場の大水深化及び将来の人手不足への対応という観点からも、自動化・ロボット化に寄せる期待は大きい。

これまで当研究室では、港湾工事における各種作業の自動化・ロボット化に取り組んできた。その一つとして、水中調査ロボット「アクアロボ」の研究及び開発を行い、第1報では1号機（陸上実験機）の形式選定とそれを基に開発した2号機（防水型実験機）による初の実海域実験について¹⁾、第2報ではこれまでの実験を基に新規に行った3号機（軽量防水型実験機）の設計及び製作について²⁾、第3報（英語版2nd Reportは第3報の誤り）では2号機を用いた釜石港内泉作業基地マウンド面上における水中誘導歩行実験について報告した³⁾。しかしながら、間欠トライポッド歩容による直進及びその場回転の組合せという単調な歩行アルゴリズムを使用していたため、ロボットの歩行速度及び行動計画の自由度はそれほど高いものではなかった。ここで実用に供し得る作業効率を求めるとすれば、歩行速度を含めた歩行性能全体のさらなる向上が必要であろう。なお、これまでの歩行実験の結果、陸上では1号機が12cm/sec、水中では2号機が10cm/sec、3号機で14cm/secであった。

そこで本研究では、軸対称脚配置を有する6足歩行ロボットに対し、その幾何学的対称性を活かした胴体の全方向運動を行うための歩容生成法を提案し、それを実現する脚運動計画法を導出することを目的としている。そして、これらのアルゴリズムが実現可能であり、有効であることを陸上実験機で検証するものである。

すなわち、第2章では、軸対称型6足歩行ロボットのモデル化と、その制御に不可欠な座標変換などについて述べる。

第3章では、凹凸地へ対応するための胴体への運動指令の生成法について述べる。この入力には操作者からのロ

ット胴体の運動指令であり、並進と回転の合成としての速度が与えられるものとする。つまり、胴体の運動は回転と並進の合成であり、運動は滑らかな曲線上を速度変化を伴いながら運動することを可能とし、単純な凹凸地における姿勢保持歩行を実現するものである。ただし、ここでは6足歩行ロボットの静的歩行を扱うため、ロボットの歩容生成や制御には運動学的な側面のみを扱い、動力学は考慮しないものとする。

第4章では、軸対称脚配置6足歩行ロボットのための新しい歩容計画法を導出する。これは、軸対称脚配置ロボットの全方向運動を実現し、常に前方ウェーブ歩容と同等の高い安定余裕を確保するものである。また、歩行周期に対する脚の支持脚期間の割合であるデューティ比が大きいほど平均接地脚数が多くなり、ロボットは安定傾向となる。しかしながら、従来の6足歩行ロボットにおいて、歩行中にデューティ比を連続的に変化させる研究は行われていない。ここでは、これらの問題への解決策となる拡張ウェーブ歩容を提案する。

第5章では、上述の歩容アルゴリズムを実現するために、(I)滑らかな曲線軌道が適用され、(II)胴体の全方向運動を可能とし、(III)そのために接地点は動的に決定される、ような一般性の高い脚先軌道計画法を提案する。

第6章では、第3、4、5章で述べられたアルゴリズムを適用したシミュレーション結果と実際の歩行ロボットに適用した実験結果との比較を行う。

第7章では、本研究で導入された歩行ロボットの制御法についての結論を述べ、第8章では、今後の課題について触れる。

なお、本報告は主に3年間に渡り行われた日米国際共同研究の成果である。また、本研究の一部は米国 National Science Foundation 研究費番号 BCS-9109989 及び 科学技術振興調整費（個別重要国際共同研究課題）の援助によるものである。

2. ロボットのモデル

2.1 アクアロボの順逆運動学

アクアロボは、各脚につき3自由度を有しているため、空間の任意の点に脚先をおくことができる。これらの関節は全て回転関節によって構成されている。ここで、関節角度から脚先の位置を求める順運動学（direct kinematics）演算及び、それとは逆に脚先の位置を決定する関節角度を求める逆運動学（inverse kinematics）演算を行う。写真-2.1にアクアロボ1号機の写真を示す。

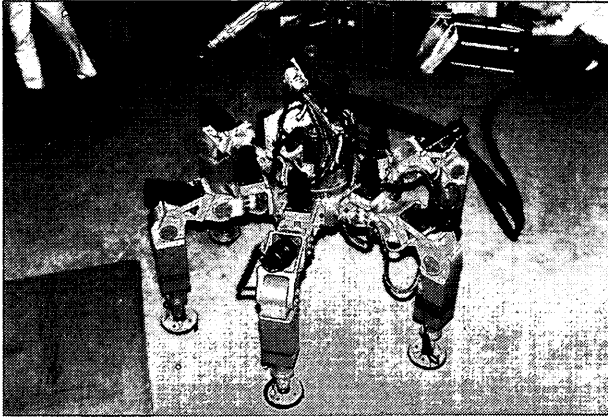


写真-2.1 アクアロボ1号機

(1) 修正Denavit-Hartenberg表記法

ロボットのリンクの連結を表すためによく用いられる修正Denavit-Hartenberg表記法²⁰⁾では、リンクごと固定されたフレームを定義すれば、次のようなリンクパラメータによって、個々のリンクとその隣のリンクとの相対的な位置関係を記述することができる(図-2.1)。

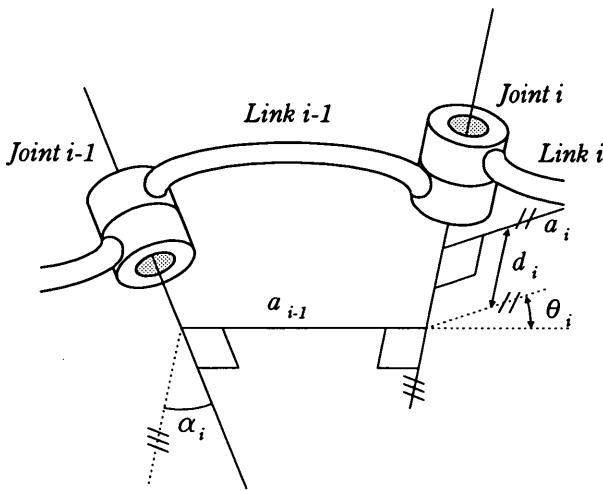


図-2.1 Denavit-Hartenberg表記法

- a_i : X_i に沿って測られる Z_i から Z_{i+1} までの距離
- α_i : Z_i と Z_{i+1} とが X_i のまわりになす角
- d_i : Z_i に沿って測られる X_{i-1} から X_i までの距離
- θ_i : X_{i-1} と X_i とが Z_i のまわりになす角

上述のように、リンクパラメータを設定すれば、隣り合う関節間の変換は次のような一般的な形の 4×4 の同次変換行列(homogeneous transformation matrix)で表すことができる。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで、 α_{i-1} は X_{i-1} についての Z_{i-1} と Z_i のなす角度である。また、 a_{i-1} は X_{i-1} に沿った Z_{i-1} から Z_i への距離である。 d_i は X_{i-1} から X_i まで Z_i に沿った距離である。 θ_i は Z_i についての X_{i-1} と X_i のなす角度である。この変換行列を使うことで、フレーム i で定義されたベクトルをフレーム $i-1$ による表現に変換する座標変換は次のようになる。

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T_i P \quad (2.2)$$

アクアロボについて、関節の名称及びフレームを図-2.2のように定義する。まず便宜的に、胴体の中心をCBまたは、Joint0とし、第一番目の関節から順にHip(Joint1), Knee1(Joint2), Knee2(Joint3), Foot(Joint4)と名付ける。次に、フレームを定義する。まず、アクアロボの胴体フレーム{B}を胴体重心に設定し、 X_B を脚1の方向にとる。フレーム{0}は、{B}を θ_0 の角度だけ回転させたものである。フレーム{1}の Z_1 軸は、Joint1関節の回転軸方向にとる。 X_1 は、Joint1(Hip)関節とJoint2(Knee)関節につなぐLink1方向にとる。同様に、フレーム{2}から{3}までを定義する。

これらの定義から、アクアロボに関する以下のような修正Denavit-Hartenberg表記法によるリンクパラメータが得られる。これまでに得られたリンクの定義及びリンクパラメータを式(2.1)に代入すれば、次のようなリンク間の同次変換行列が得られる。

$${}^B_0T = \begin{bmatrix} C_0 & -S_0 & 0 & 0 \\ S_0 & C_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & a_0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & a_3 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

表-2.1 アクアロボの修正DHパラメータ

i	α_{i-1} [deg]	a_{i-1} [cm]	d_i [cm]	θ_i [deg]	Range (Aqarobot prototype-1)
-1	α_{WORLD}	a_{WORLD}	d_{WORLD}	θ_{WORLD}	
0	0	0	0		$\theta_0 = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$
1	0	a_0	0	θ_1	$a_0 = 30.0,$ $-60^\circ \leq \theta_1 \leq 60^\circ$
2	-90	a_1	0	θ_2	$a_1 = 14.0,$ $-131.3^\circ \leq \theta_2 \leq 56.7^\circ$
3	0	a_2	0	θ_3	$a_2 = 25.0,$ $-138.7^\circ \leq \theta_3 \leq 41.3^\circ$
4	0	a_3	0	θ_4	$a_3 = 60.0,$ $-45^\circ \leq \theta_4 \leq 45^\circ$

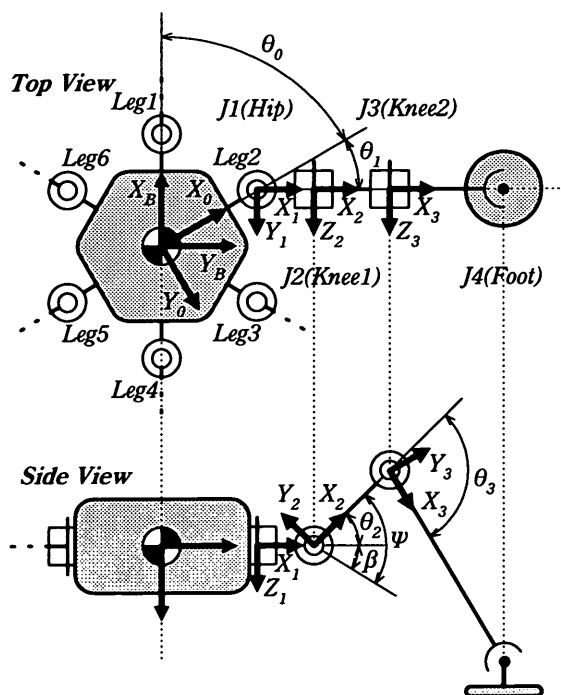


図-2.2 アクアロボに関する幾何学的表現

(2) アクアロボの運動学

次に上の変換行列を掛け合わせることで、胴体フレームから脚先への変換行列 B_4T を求めることができる。ここで、個々の変換行列の4列目の縦ベクトルの要素は平行移動量、すなわち次フレームへの原点を与える。したがって、 B_4T の4列目の縦ベクトルは、胴体座標系から見た脚先の位置を表している。

$${}^B_1T = {}^B_0T {}^0_1T = \begin{bmatrix} C_{01} & -S_{01} & 0 & a_0 C_0 \\ S_{01} & C_{01} & 0 & a_0 S_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$${}^B_2T = {}^B_0T {}^0_1T {}^1_2T = \begin{bmatrix} C_{01} C_2 & -C_{01} S_2 & -S_{01} & a_0 C_0 + a_1 C_{01} \\ S_{01} C_2 & -S_{01} S_2 & C_{01} & a_0 S_0 + a_1 S_{01} \\ -S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$${}^B_3T = {}^B_0T {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} C_{01} C_{23} & -C_{01} S_{23} & -S_{01} & a_0 C_0 + C_{01}(a_1 + a_2 C_2) \\ S_{01} C_{23} & -S_{01} S_{23} & C_{01} & a_0 S_0 + S_{01}(a_1 + a_2 C_2) \\ -S_{23} & -C_{23} & 0 & -a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$${}^B_4T = {}^B_0T {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} C_{01} C_{234} & -C_{01} S_{234} & -S_{01} & a_3 C_{01} C_{23} + a_0 C_0 + C_{01}(a_1 + a_2 C_2) \\ S_{01} C_{234} & -S_{01} S_{234} & C_{01} & a_3 S_{01} C_{23} + a_0 S_0 + S_{01}(a_1 + a_2 C_2) \\ -S_{234} & -C_{234} & 0 & -a_3 S_{23} - a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ただし、

$$C_i = \cos \theta_i \quad (2.12)$$

$$S_i = \sin \theta_i \quad (2.13)$$

$$C_{ij} = C_i C_j - S_i S_j = \cos(\theta_i + \theta_j) \quad (2.14)$$

$$S_{ij} = S_i C_j + C_i S_j = \sin(\theta_i + \theta_j) \quad (2.15)$$

である。

(3) アクアロボの逆運動学

ここでは、直感的に理解しやすい幾何学的解法を用いてアクアロボの逆運動学問題を解く。

まず、図-2.2において、 $\Delta J_0 J_1 J_4$ を考える。 θ_1 について解くために、この三角形に第二余弦定理を適用する。

$$\begin{aligned} p_x^2 + p_y^2 &= a_0^2 + b_1^2 - 2a_0 b_1 \cos(180 - \theta_1) \\ &= a_0^2 + b_1^2 + 2a_0 b_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

よって、次の関係を得る。

$$\cos \theta_1 = C_1 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - a_0^2 - b_1^2}{2a_0 b_1} \quad (2.17)$$

ただし、

$$b_1 = \sqrt{(p_x - a_0 \cos \theta_0)^2 + (p_y - a_0 \sin \theta_0)^2} \quad (2.18)$$

である。したがって θ_1 は、次式で求められる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - C_1^2}}{C_1} \quad (2.19)$$

θ_2 について解くために、 $\Delta J_2 J_3 J_4$ について考える。図-2.2に示すように、角度 ϕ と β を導入する。図から、

$$\tan \beta = \frac{p_z}{b_2} \quad (2.20)$$

ここで、

$$b_2 = b_1 - a_1 \quad (2.21)$$

である。角度 ϕ を

$$\psi = \theta_2 + \beta \quad (2.22)$$

として、さらに第二余弦定理を適用する。

$$a_3^2 = a_2^2 + b_3^2 - 2a_2 b_3 \cos \psi \quad (2.23)$$

よって、次の関係を得る。

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{a_2^2 + b_3^2 - a_3^2}{2a_2 b_3} \\ \sin \phi &= \pm \sqrt{1 - \phi} \end{aligned} \quad (2.24)$$

ただし、

$$b_3 = \sqrt{b_2^2 + p_z^2} \quad (2.25)$$

である。したがって θ_2 は、式(2.24)、(2.20)を式(2.22)に代入することにより、 θ_2 は次式で求められる。

$$\theta_2 = \psi - \beta = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 \psi}}{\cos \psi} = \tan^{-1} \frac{p_z}{b_2} \quad (2.26)$$

同様に、 θ_3 について解くために、 $\Delta J_2 J_3 J_4$ に第二余弦定理を適用する。

$$\begin{aligned} b_3^2 &= a_2^2 + a_3^2 - 2a_2 a_3 \cos(180 - \theta_3) \\ &= a_2^2 + a_3^2 + 2a_2 a_3 \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (2.27)$$

よって、次の関係を得る。

$$\cos \theta_3 = C_3 = \frac{b_3^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 b_3} \quad (2.28)$$

したがって、 θ_3 は、次式で求められる。

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - C_3^2}}{C_3} \quad (2.29)$$

式 (2.19), (2.26), (2.29) には、正負の符号が現れるため、8通りの解が存在し得る。それらのうち機構的制限を越えるいくつかの解を除去し、残りの解からロボットの現在の状態に最も近いものを選択する。

2.2 アクアロボの順逆ヤコビ行列

次に、ロボットのリンクの速度及び角速度を計算する問題について考える。マニピュレータは剛体が鎖状に接続しており、それぞれの運動は隣どうし関連しあっている。このような構造により、それぞれのリンクの速度はベースから順番に計算することができる。すなわち、リンク間で速度が伝播することになる。

ヤコビ行列 (Jacobian) は、一般的にロボットマニピュレータ等の関節角速度をアームの先端のデカルト速度に変換する行列である。本節では、このヤコビ行列とアーム先端のデカルト速度を関節角速度に変換する逆ヤコビ行列 (inverse Jacobian) を求める。

(1) ヤコビ行列

隣り合う二つのリンクの ω ベクトルの関係を同一フレームで表現するためには、角速度を加えればよい。つまり、リンク $i+1$ の角速度は、リンク i の角速度に関節 $i+1$ の角速度による新しい項を加えたものと等しい。

$${}^{i+1}\omega = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (2.30)$$

$${}^{i+1}v = {}^{i+1}R \{ {}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^{i+1}P_{i+1} \} \quad (2.31)$$

$$J(\Theta) = \begin{bmatrix} -\left(\begin{smallmatrix} a_1 + a_2 C_2 \\ + a_3 C_{23} \end{smallmatrix} \right) S_{01} - \left(\begin{smallmatrix} a_2 S_2 \\ + a_3 S_{23} \end{smallmatrix} \right) C_{01} - a_3 C_{01} S_{23} \\ \left(\begin{smallmatrix} a_1 + a_2 C_2 \\ + a_3 C_{23} \end{smallmatrix} \right) C_{01} - \left(\begin{smallmatrix} a_2 S_2 \\ + a_3 S_{23} \end{smallmatrix} \right) S_{01} - a_3 S_{01} S_{23} \\ 0 \quad -\left(a_2 C_2 + a_3 C_{23} \right) - a_3 C_{23} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

(2) 逆ヤコビ行列

逆ヤコビ行列は、前節で求めたヤコビ行列の逆行列を求めることと等価である。したがって、逆行列は次式で表される。

$$J(\Theta)^{-1} = \frac{1}{\det(J(\Theta))} \text{adj}(J(\Theta)) \quad (2.33)$$

ここで、

$$\det(J(\Theta)) = (a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) a_2 a_3 S_3 \quad (2.34)$$

$$\text{adj}(J(\Theta)) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{21} & J_{31} \\ J_{12} & J_{22} & J_{32} \\ J_{13} & J_{23} & J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} J_{11} &= -a_2 a_3 S_{01} S_3 \\ J_{12} &= (a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) a_3 C_{01} C_{23} \\ J_{13} &= -(a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) (a_2 C_2 + a_3 C_{23}) C_{01} \\ J_{21} &= a_2 a_3 C_{01} S_3 \\ J_{22} &= (a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) a_3 S_{01} C_{23} \\ J_{23} &= -(a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) (a_2 C_2 + a_3 C_{23}) S_{01} \\ J_{31} &= 0 \\ J_{32} &= -(a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) a_3 S_2 \\ J_{33} &= (a_1 + a_2 C_2 + a_3 C_{23}) (a_2 S_2 + a_3 S_{23}) \end{aligned} \quad (2.35)$$

2.3 世界座標系から胴体座標系への変換行列

本節では、世界 (world) フレーム {W} から胴体 (body) フレーム {B} への変換行列を導く。ここでは、ロボット胴体の姿勢を記述するために、X-Y-Z 固定角表現を用いる²⁾。この表現方法では、X 軸まわりの回転角ロール (roll) 角 ϕ 、Y 軸まわりをピッチ (pitch) または elevation) 角 θ 、Z 軸まわりをヨー (yaw または azimuth) 角 ψ とする (図-2.3)。

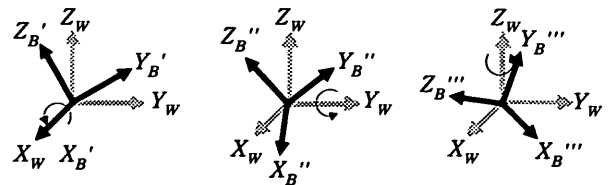


図-2.3 X-Y-Z 固定角表現

この回転変換行列 (rotation matrix) ${}^W_B R$ は、次のような 4×4 の同次変換行列となる。

$${}^W_B \mathbf{R}_{XYZ}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

一般的な同次変換の形は次の式で表される (図-2.4)。

$${}^W_B \mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^W_B \mathbf{R} & {}^W \mathbf{P}_{BO} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi & X_{BO} \\ -S_\psi C_\theta & -S_\psi S_\theta S_\phi & -S_\psi S_\theta C_\phi & Y_{BO} \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & Z_{BO} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

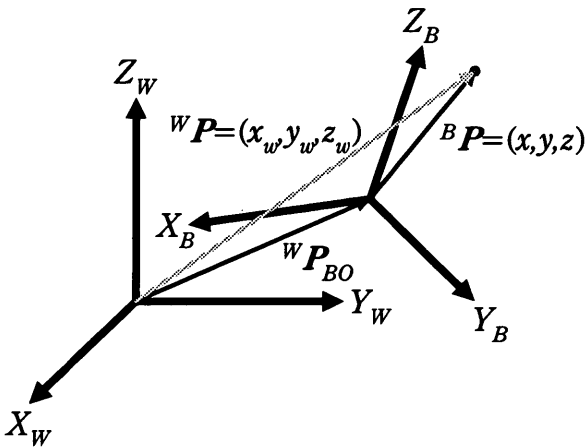


図-2.4 座標変換

ここで、逆変換行列 ${}^W_B \mathbf{T}^{-1}$ も求めておく。

$${}^W_B \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} {}^W_B \mathbf{R}^T & -{}^W_B \mathbf{R}^T {}^W \mathbf{P}_{BO} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

ただし、

$${}^W_B \mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$${}^W_B \mathbf{R}^T {}^W \mathbf{P}_{BO} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{BO} \\ Y_{BO} \\ Z_{BO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta X_{BO} + S_\psi C_\theta Y_{BO} - S_\theta Z_{BO} \\ (C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi) X_{BO} + (S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi) Y_{BO} + C_\theta S_\phi Z_{BO} \\ (C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi) X_{BO} + (S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi) Y_{BO} + C_\theta C_\phi Z_{BO} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

である。したがって、脚先位置の胴体座標系と世界座標系間の変換は以下のように表すことができる。

$${}^B \mathbf{P} = {}^W_B \mathbf{T}^{-1} {}^W \mathbf{P} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta (x_w - X_{BO}) + S_\psi C_\theta (y_w - Y_{BO}) - S_\theta (z_w - Z_{BO}) \\ (C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi) (x_w - X_{BO}) + (S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi) (y_w - Y_{BO}) + C_\theta S_\phi (z_w - Z_{BO}) \\ (C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi) (x_w - X_{BO}) + (S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi) (y_w - Y_{BO}) + C_\theta C_\phi (z_w - Z_{BO}) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.4 可動範囲の制限

ここで、次章以降で導入される制限可動範囲 (constrained working volume: CWV) を定義しておく¹⁰⁾。

それぞれの脚のCWVは脚先の到達可能範囲の内側にとられる。一般に各脚の可動範囲は重なり合うが、ここでは計算の簡略化のため、それぞれが重ならないように制限された円柱状のCWVを設定する。また、CWVの中心を脚の基準位置 (leg reference point) \mathbf{p}_{Li} とする。図-2.5、図-2.6にそれぞれ、アクアロボ1号機の可動範

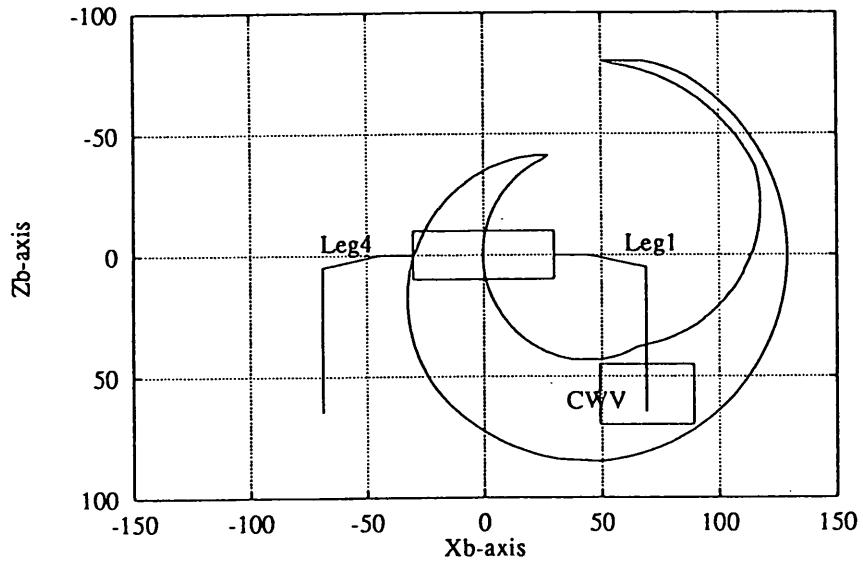


図-2.5 アクアロボの鉛直可動範囲

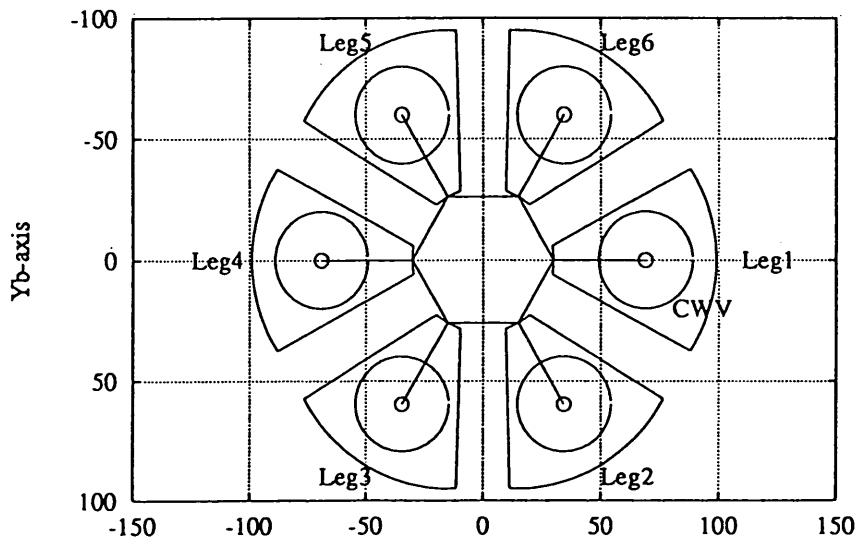


図-2.6 アクアロボの水平可動範囲

囲の側面図及び平面図を示す。図-2.5では、外側の円弧で囲われた部分が関節角度の機構的限界による可動範囲を表し、図-2.6では、脚先の円盤状の足裏を互いに踏むことのない扇形が可動範囲を表している。それぞれの図の内側に示した円柱が本論文で設定されているCWVである。

3. 胴体軌道の生成

3.1 胴体の運動

与えられた作業に対し、どのような形式でロボットの運動指令を与えるかは重要である。本節では、歩行アルゴリズムへの運動指令の入力方法を述べる。

ロボットの運動する環境に固定された3次元のデカルト座標系を考える(図-3.1)。これを世界座標系(world coordinate system)とし、 W の添字をつける。 Z_W 軸は鉛直下向きとする。さらに、ロボットの胴体中心に固定された胴体座標系(body coordinate system)とし、 B の添字をつける。 Z_B 軸は鉛直下向きとする。変数の左肩添字はその変数の表される座標系を示す。

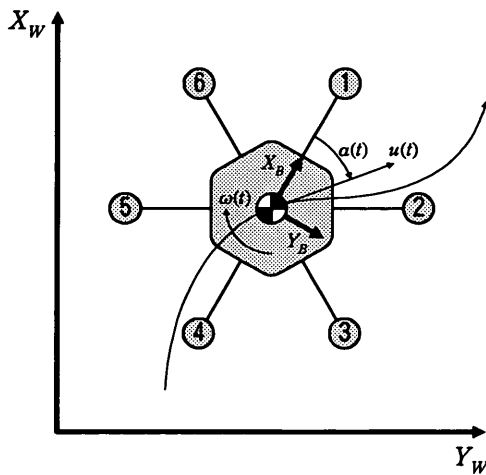


図-3.1 ロボットの座標系と運動指令

胴体の運動は、並進及び回転のそれぞれの成分から構成される。ロボットの並進運動は、世界座標系における位置 ${}^W p(t)$ であり、時間の関数である。

$${}^W p(t) = (p_x(t), p_y(t), p_z(t))^T \quad (3.1)$$

ロボットの回転運動は世界座標系における姿勢 ${}^W \gamma(t)$ 、すなわち、ロール角 γ_x 、ピッチ角 γ_y 、ヨー角 γ_z であり、これらも時間の関数である。

$${}^W \gamma(t) = (\gamma_x(t), \gamma_y(t), \gamma_z(t))^T \quad (3.2)$$

位置と姿勢の導関数は次のようになる。

$${}^W v(t) \equiv (v_x(t), v_y(t), v_z(t))^T \equiv \frac{d{}^W p(t)}{dt} \quad (3.3)$$

$${}^W \omega(t) \equiv (\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t))^T \equiv \frac{d{}^W \gamma(t)}{dt} \quad (3.4)$$

3.2 2次元空間の運動

本研究では、操作者がロボットに与える運動指令は2次元平面上の動きに制限する。また、胴体高さ $p_z(t)$ は地面から一定に、ロール角とピッチ角は0に保たれるように制御されるものとする。したがって、前節の運動指令は、

$${}^W p(t) = (p_x(t), p_y(t), p_z(0))^T \quad (3.5)$$

$${}^W \gamma(t) = (0, 0, \gamma_z(t))^T \quad (3.6)$$

となり、ロボットの運動は2次元上と等価になる。これら3つのパラメータは、2次元平面上での運動を完全に記述するものである。また、これらの導関数は、

$${}^W v(t) = (v_x(t), v_y(t), 0)^T \quad (3.7)$$

$${}^W \omega(t) = (0, 0, \omega_z(t))^T \quad (3.8)$$

となる。

並進運動の方向 $\theta(t)$ は以下のように定義される。

$$\theta(t) \equiv \tan^{-1} \frac{v_y(t)}{v_x(t)} \quad (3.9)$$

アクアロボは全方向運動(omnidirection)が可能であるので、 $\theta(t)$ は胴体の姿勢 $\gamma_z(t)$ と必ずしも等しいわけではない。したがって、ロボットの胴体方向と進行方向のなす角、側行角(crab angle) $\alpha(t)$ が次式のように定義される(図-3.1)。

$$\alpha(t) \equiv \theta(t) - \gamma_z(t) \quad (3.10)$$

2次元平面上でのロボットの運動を記述するにあたり、Naval Postgraduate Schoolの自律移動ロボットYamabico-11プロジェクトで開発されたMML(Model-based Mobile robot Language)を適用する¹⁰⁾。MMLではロボットの運動は $(u(t), \kappa(t), \omega_z(t))$ で記述される。ここで、 $u(t)$ は胴体の並進速度、 $\kappa(t)$ は胴体運動の軌道、 $\omega_z(t)$ は胴体の回転速度である。このMMLによる運動の記述は、以下のように変換することができる。

$${}^B v(t) = \begin{bmatrix} u(t) \cos \alpha(t) \\ u(t) \sin \alpha(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$${}^B \omega(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z(t) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

最終的にロボットへの胴体運動指令 Ω は、以下のように定義される。

$$\Omega \equiv ({}^B v(t), {}^B \omega(t)) \quad (3.13)$$

胴体の回転部分 ${}^W \omega$ が0であるなら、それぞれの脚は胴体と等しい並進速度 ${}^W v$ で運動する。しかしながら、胴体の並進も回転も零ではないので、それぞれの脚の速度は異なり、脚の運動を計算することが必要となる。ここで、 ${}^B p_{Li}$ を胴体座標に固定した脚の基準点（ここでは可動範囲の中心、2.4節参照）の位置と世界座標系における脚 i の速度 ${}^W v_{Li}$ は、

$${}^W v_{Li}(t) = {}^W R^{-1} \{ {}^B v(t) + {}^B \omega(t) \times {}^B p_{Li}(t) \} \quad (3.14)$$

で表される。ここで、 ${}^W R^{-1}$ は胴体座標系から世界座標系への回転変換行列である¹¹⁾（第2章参照）。また、

$$u_i(t) = |{}^W v_{Li}(t)| \quad (3.15)$$

を脚 i における速度とする。前述のようにこの値は全て

の脚で等しいというわけではない。これらの値 $(u_1(t), \dots, u_n(t))$ が次章以降で述べられる歩容生成アルゴリズムへの入力となる。

3.3 胴体高さや姿勢の制御

本研究では、ロボットの胴体運動の指令及び経路は、世界座標系の水平面上で記述される。つまり、 v_x, v_y, ω_z がオペレータから与えられるものとする。その他の成分 v_z, ω_x, ω_y は、ロボットの姿勢を水平に、また、地面からの胴体高さを一定に保つように生成される。

本節では、不整地をロボットの胴体を水平に保ったまま静的に安定な歩行をすることを考える。姿勢を水平に保つということは、積荷や搭載機材を安定させることや、重力分離型アクチュエータ(gravity decoupled actuation)の利点の活用といった面において意味がある⁹⁾。しかしながら、急な斜面を登る場合など可動範囲の制約により胴体を傾斜せざるを得ない状況も生じるがここでは取り扱わない。したがって、地形については、胴体を傾けずに静的に安定な歩行が可能な程度の傾斜及び凹凸の範囲であるものとする（図-3.2）。

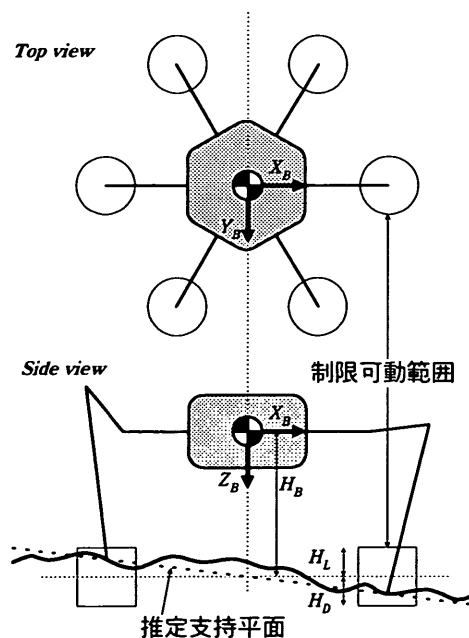


図-3.2 地形モデルと推定支持平面

ここでは、接地脚より推定される平面から胴体高さを一定の高さに保つことを考え、空間の平面の方程式の一般形を次式で表すことにする。

$$z = Ax + By + C \quad (3.16)$$

空間の任意の3点が与えられたとき、空間の平面の方程

式は次の式のようなになる²⁰⁾。

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.17)$$

したがって、Cramerの公式を用いれば、

$$z = \frac{\Delta_1}{\Delta} x + \frac{\Delta_2}{\Delta} y + \frac{\Delta_3}{\Delta} \equiv Ax + By + C \quad (3.18)$$

となる。ただし、

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.19)$$

$$= (y_2 - y_3)x_1 + (y_3 - y_1)x_2 + (y_1 - y_2)x_3$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} z_1 & y_1 & 1 \\ z_2 & y_2 & 1 \\ z_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.20)$$

$$= (y_2 - y_3)z_1 + (y_3 - y_1)z_2 + (y_1 - y_2)z_3$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.21)$$

$$= (z_2 - z_3)x_1 + (z_3 - z_1)x_2 + (z_1 - z_2)x_3$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad (3.22)$$

$$= (x_3z_2 - x_2z_3)y_1 + (x_1z_3 - x_3z_1)y_2 + (x_2z_1 - x_1z_2)y_3$$

である。

支持脚のうち、最も新しく支持脚となった3脚と最も古く支持脚となった3脚の脚先位置から上述の手順により支持平面を計算しそれらの平均をとったものを推定支持平面 (estimated support plane) とする。

$$v_{zff} = A\dot{x}_d + B\dot{y}_d \quad (3.23)$$

ここで、 \dot{x}_d, \dot{y}_d は操作者によって指示される2次元平面での胴体の速度指令である。次の制御周期での胴体の目標位置 (x_d, y_d) は、数値積分と推定支持平面とを用いて、

$$x_d = x_a + \dot{x}_d \cdot \Delta t \quad (3.24)$$

$$y_d = y_a + \dot{y}_d \cdot \Delta t \quad (3.25)$$

$$z_d = Ax_d + By_d + C + H_B \quad (3.26)$$

で表される。ここで、 Δt は制御周期である。また、位置及び速度の目標値からのずれによる加速度フィードバック項 a_{zfb} を次のように決める。

$$a_{zfb} = 2k(v_{zff} - \dot{z}_a) + k^2(z_d - z_a) \quad (3.27)$$

ここで、 k は減衰振動をするように定められる正の定数である。したがって、 z 方向の胴体速度指令の目標値 \dot{z}_d は、フィードフォワード項とフィードバック項の合成として求められる。

$$\dot{z}_d = v_{zff} + a_{zfb} \cdot \Delta t \quad (3.28)$$

このような手法により、胴体高さが支持平面から一定に保たれる。図-3.3にこのブロック線図を示す。 ω_x, ω_y についても、ロボット胴体の姿勢を保つように同様の制御方針が採られる。

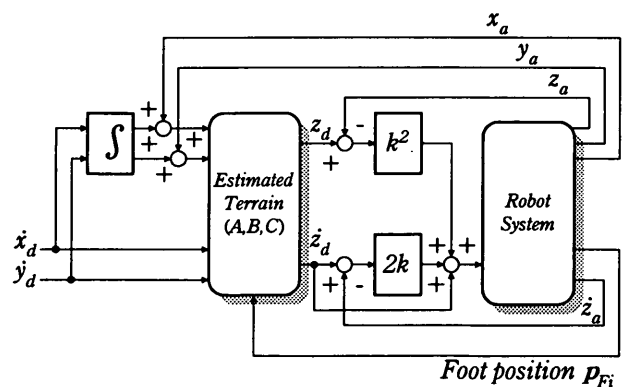


図-3.3 胴体高さ制御のブロック線図

4. 歩容アルゴリズム

4.1 周期歩容のパラメータ計算

(1) 準周期歩容

これまでも6足歩行ロボットのための周期歩容生成法はいくつか提案されているが、通常の周期歩容は、時間軸に対して周期一定である^{6,7,16)}。ここでは、ロボットの機構的な限界を考慮して時間を正規化し、位相変数の概念を採り入れ、この位相変数軸上で周期的であると見なす準周期歩容 (semi periodic gait) を採用する。したがって、様々な位相変数を求めるということは、周期的な歩容が適用された歩行ロボットの振舞いを把握する上で重要である。本節で述べられる方法は、Lee and Orin¹⁰⁾の研究に基づいている。

周期歩容生成や脚軌道生成には、2.4節で定義された制限可動範囲 (constrained working volume: CWV) の概念を導入する¹⁰⁾。それぞれの脚のCWVとして、脚先の到達可能範囲の内側に重ならないように制限された円柱状のCWVを設定する。脚*i*の瞬時運動学余裕 (temporal kinematic margin) t_{Si} は、現在の速度を維持したままの状態では支持脚*i*の先端がCWVの境界に達するまでの時間的な余裕である¹⁰⁾。この定義より、瞬時運動学余裕は、

$$t_{Si} = \frac{d}{|v_{Fi}|} \quad (4.1)$$

で表される。ここで、 v_{Fi} は、現時点での脚*i*の胴体座標系における脚先速度であり、 d は脚先位置とそこから v_{Fi} 方向に伸ばした直線とCWVの境界との交点との距離である。したがって、歩行周期 (kinematic period) τ は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\tau = \frac{1}{\beta} \min_i \left\{ \frac{t_{Si}}{1 - \phi_{Si}} \right\} \quad (4.2)$$

次に、歩行位相変数 (kinematic period) ϕ は、

$$\phi = \phi(t) = \int_0^t \frac{ds}{\tau(s)} \quad (4.3)$$

で表される。これは時間変数と同様なものであるが、歩行ロボットの歩容を表現する手段としてより適したものである¹⁰⁾。

脚*i*がある瞬間に接地したとすると、そのときの歩行

位相変数 ϕ を脚*i*の脚位相差 (relative phase) ψ_i という。

$$\psi_i = [\phi]_{\text{mod}1} \quad (4.4)$$

ここで、mod1はmodulol演算を意味する。

脚*i*の位相を決める脚位相変数 (leg phase variable) ϕ_{Li} は次式で求められる¹⁰⁾。

$$\phi_{Li} = [\phi - \psi_i]_{\text{mod}1} \quad (4.5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} 0 \leq \phi_{Li} < \beta & \quad \text{support phase} \\ \beta \leq \phi_{Li} < 1 & \quad \text{transfer phase} \end{aligned}$$

である。支持脚相の位相変数である脚*i*の支持脚相変数 (support phase variable) $\phi_{Si} \in [0,1]$ は、接地時を0、引き上げ時を1とした変数であり、次式で求められる。

$$\phi_{Si} = \frac{\phi_{Li}}{\beta} \quad (4.6)$$

遊脚相の位相変数である脚*i*の遊脚相変数 (transfer phase variable) $\phi_{Ti} \in [0,1]$ は、引き上げ時を0、接地時を1とした変数であり、次式で求められる¹⁰⁾。

$$\phi_{Ti} = \frac{\phi_{Li} - \beta}{1 - \beta} \quad (4.7)$$

(2) デューティ比の計算

ロボットの歩行の状態として、支持脚相 (support phase) 及び遊脚相 (transfer phase) の二つの相を考慮することができる⁹⁾。脚*i* ($1 \leq i \leq n$) が支持脚相にある期間を支持脚期間 (support period) τ_{Si} 、遊脚相にある期間を遊脚期間 (transfer period) τ_{Ti} とし、支持脚期間と遊脚期間の合計

$$\tau \equiv \tau_{Si} + \tau_{Ti} \quad (4.8)$$

を歩行周期 (kinematic period) τ とする。脚*i*のデューティ比 (duty factor) β_i は次式で定義される。

$$\beta_i \equiv \frac{\tau_{Si}}{\tau_i} \quad (4.9)$$

本研究では、デューティ比は後述するように、胴体の運動速度に依存する。

ところで、 U を脚の胴体に対する平均水平方向復帰速度 (average horizontal swing speed) とする。 U はいわばロボットの機構的な限界速度と見なすことができる。世界座標系における歩幅は、脚位相変数一周期の間に脚の基準点 (leg reference point) の移動する距離に等しいため、

$$\tau_i(t)(1 - \beta_i(t))(U_i(t) + u_i(t)) = \tau(t)u_i(t) \quad (4.10)$$

となる。したがって、

$$\beta_i(t) = \frac{U}{u_i(t) + U} \quad (4.11)$$

なる関係が導かれる。これは歩行ロボットの脚 i が取り得るデューティ比の最大値である。しかしながら、脚先では胴体移動速度に加えてその回転運動に伴う速度成分を考慮する必要がある。また、ロボットの歩容がレギュラ歩容であるためには、全てのデューティ比が等しくなければならない。よって、ロボットのデューティ比は、式(4.11)に胴体の回転運動に起因する速度項を追加して、その最大のデューティ比をとる^{14,15)}。

$$\beta(t) \leq \frac{U}{u_i(t) + |\omega(t)R| + U} \equiv \max_i \beta_i(t) \quad (4.12)$$

ただし、 R は胴体中心から脚のCWVの最も外側の点までの距離である。

4.2 ウェーブ歩容

ウェーブ歩容は、レギュラかつ対称な歩容である。左右対称脚配置の $2n$ 脚を有するロボットの歩容の数学的な表現は、次のようになる⁸⁾。

$$\psi_{2m+1} = F(m\beta) \quad (4.13)$$

$m = 1, 2, 3, \dots, n-1$

ただし、 $F(x)$ は x の小数部分を意味する関数である。 m は脚1に続いて左右、前後へと番号がつけられている。

図-4.1に左右対称型脚配置のロボットの模式図を示し、図-4.2にそのウェーブ歩容の歩容線図を示す。

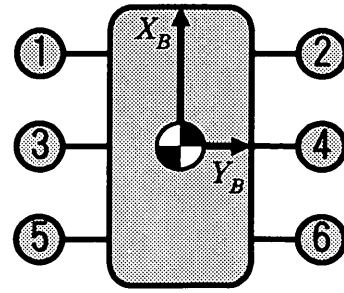


図-4.1 脚の配置

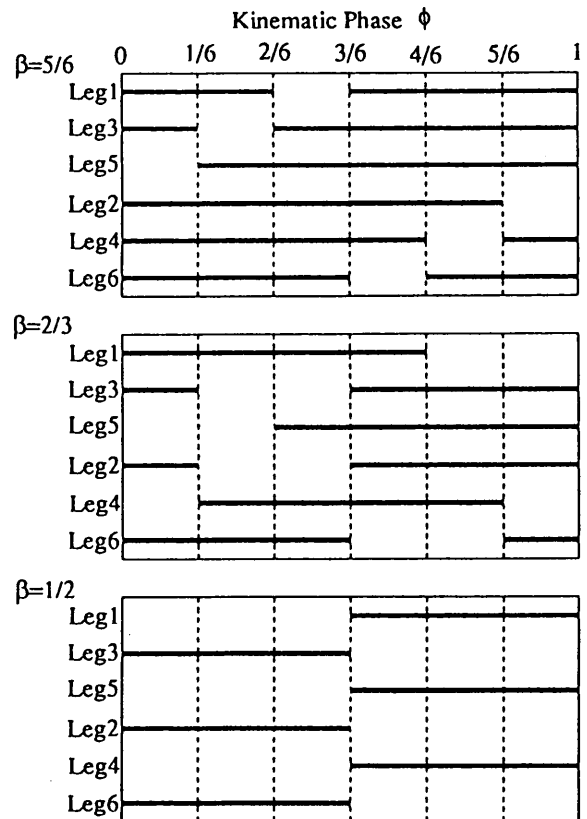


図-4.2 ウェーブ歩容の歩容線図

4.3 拡張ウェーブ歩容

ここで対象とした軸対称6足歩行ロボットの脚配置は既出の図-3.1の通りである。軸対称ロボットが側行角 $\pi/6$ で歩行する場合は左右対称脚配置ロボットと見なすことができる。そのウェーブ歩容の歩容線図 (gait diagram) を図-4.3に示す。

本節では、軸対称配置の6足歩行ロボットについてウェーブ歩容をデューティ比と側行角の関数としてとらえた拡張ウェーブ歩容 (expanded wave gait) を導出する。前方ウェーブ歩容は、左右対称脚配置の歩行ロボットにおいて、脚の引き上げ動作が後ろから前に向かって伝播するような順序で行われる歩容であり、左右対称脚配置

の6足歩行ロボットでは、前方ウェーブ歩容の安定余裕が高いことが示されている⁹⁾。また、Oohashiら¹⁷⁾は軸対称脚配置のロボットに関するいくつかの周期歩容の安定余裕について調べ、ほとんどのケースでウェーブ歩容が優れていることを示している。

式(4.12)によって最大のデューティ比を見出したあとは、全ての脚位相差 ψ_i を側行角 α とデューティ比 β の関数 Ψ_i として、決めなければならない。

$$\psi_i = \Psi_i(\alpha, \beta) \quad (4.14)$$

ここで、 α と β は時間の関数である。したがって、 Ψ_i は連続である必要がある。歩容計画では、脚位相差が歩容を表現することから、 Ψ_i を求めることが最も重要なことである。

(1) デューティ比可変歩容

側行角 $\alpha = \pi/6$ の場合は、左右対称型脚配置ロボットと見なすことができるため、側行角を固定、胴体への速度指令を可変とし、この場合の脚位相差 $\Psi_i(\pi/6, \beta)$ を求める。デューティ比 β は、式(4.12)によって設定されるため、胴体速度に応じて変化する。図-4.3は、 $\beta = 5/6, 2/3, 1/2$ のときのウェーブ歩容の歩容線図である。まず、図-4.3中の $\beta = 2/3, 1/2$ の場合を取りだし、これらの2つの線分を線形に内挿することで、デューティ比 $\beta \in [1/2, 2/3]$ の範囲の任意の値の時の脚位相差を得る(図-4.4)。同様に、これらに対して単に外挿を行うことで、デューティ比 $[0, 1]$ の全ての範囲の脚位相差を得ることができる(図-4.5)。このようにして、側行角 $\alpha = \pi/6$ のときの脚位相差 ψ_i を β の関数として次式のように導くことができる。

$$\Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \beta\right) = \left[6 \left\{ \left(\beta - \frac{1}{2}\right) \Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right) \Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{1}{2}\right) \right\} \right]_{\text{mod } 1} \quad (4.15)$$

図-4.6は、与えられたデューティ比 β と歩行位相変数 ϕ の進行に対する支持脚の組合わせを表している。ロボットが移動している間、ロボットの接地脚の組合わせは、その瞬間の図中の β と ϕ の指し示す範囲内ようになる。ロボットが一定速度 u で回転なしに移動すると、ロボットの状態は、図中のその速度に相当するデューティ比の位置を横一直線に移動する。ロボットの運動指令速度が増加すると、デューティ比は減少する。したがって、この図におけるロボットの状態の軌跡は、進行と伴に右下がりになる。また、この図から $\beta = 1/2$ のときは、良く

知られる三脚交互歩容となることがわかる。この歩容アルゴリズムの重要性は、歩行中であってもデューティ比 β が $[0, 1]$ の範囲で可変であることである。

(2) 側行角可変-デューティ比可変歩容

軸対称脚配置を有するロボットについて、全方向性運動を行なった場合、後向きに進んだ場合は後方ウェーブ歩容と等価になるため、安定余裕が低下してしまう。そこで、これを避けるためにウェーブの方向を進行方向に対して変化させることで、前方ウェーブ歩容と同等の安定余裕を得ることを目指す。まず、デューティ比を固定して、任意の側行角の場合について考える。

図-4.7において、 $\beta = 2/3$ に固定して、上の段の線分は $\alpha = \pi/6$ のときの、そして、下段の線分は $\alpha = -\pi/6$ のときの支持脚相を示している。これらの線分を内挿することで、その間の任意の側行角に対する歩容が得られる。デューティ比を固定した際は、側行角を $[0, 2\pi]$ の範囲に拡張することは容易である。図-4.8は、 $\beta = 2/3$ と $\beta = 1/2$ の場合の脚位相差 $\Psi_i(\alpha, \beta)$ を示しており、これは脚の接地のタイミングを意味する。この関数は次のように表される。

for $i = 1, 3, 5$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} 0 & (0 \leq \alpha' < \pi/6) \\ \alpha'/2 & (\pi/6 \leq \alpha' < 5\pi/6) \\ 1/3 & (5\pi/6 \leq \alpha' < 7\pi/6) \\ 1/3 - \alpha'/2 & (7\pi/6 \leq \alpha' < 11\pi/6) \\ 0 & (11\pi/6 \leq \alpha' < 2\pi) \end{cases}$$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) = 1/4$$

for $i = 2, 4, 6$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} 1/2 & (0 \leq \alpha' < \pi/6) \\ \alpha'/2 + 1/2 & (\pi/6 \leq \alpha' < 5\pi/6) \\ 5/6 & (5\pi/6 \leq \alpha' < 7\pi/6) \\ 5/6 - \alpha'/2 & (7\pi/6 \leq \alpha' < 11\pi/6) \\ 1/2 & (11\pi/6 \leq \alpha' < 2\pi) \end{cases}$$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) = 3/4$$

(4.16)

ここで、

$$\alpha' = \left[\alpha - \frac{(i-1)\pi}{6} \right]_{\text{mod}(2\pi)} \quad (4.17)$$

である。

ここで、デューティ比が可変である場合を考える。 α と β が任意に可変である歩容を計画するために、前

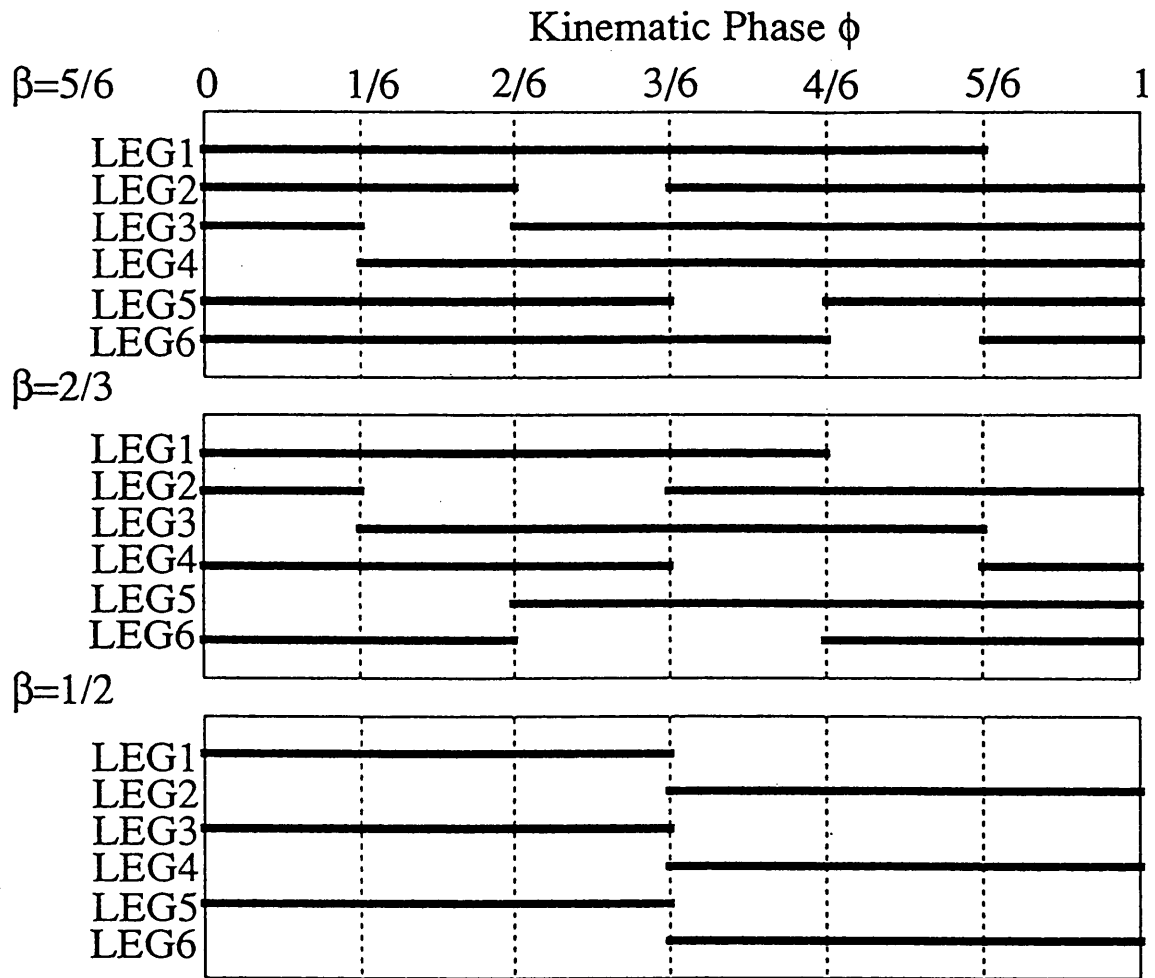


図-4.3 ウェーブ歩容の歩容線図

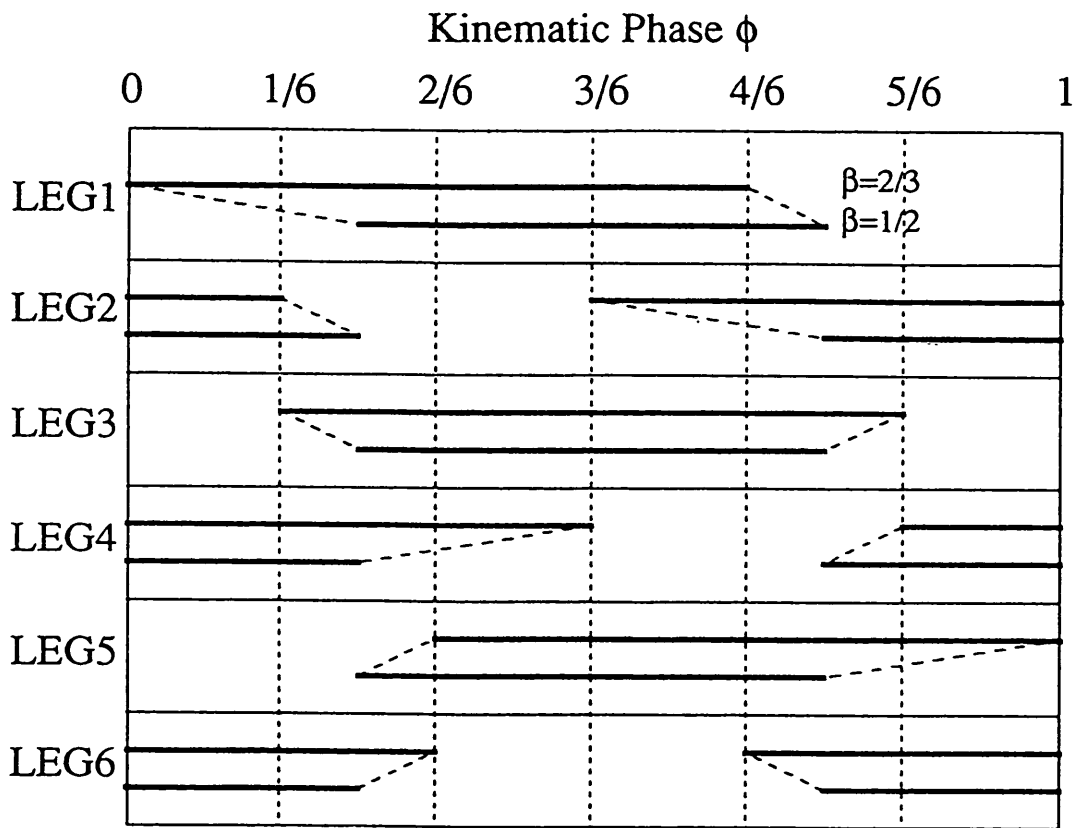


図-4.4 β の内挿によって得られたウェーブ歩容の歩容線図 ($\alpha = \pi/6$)

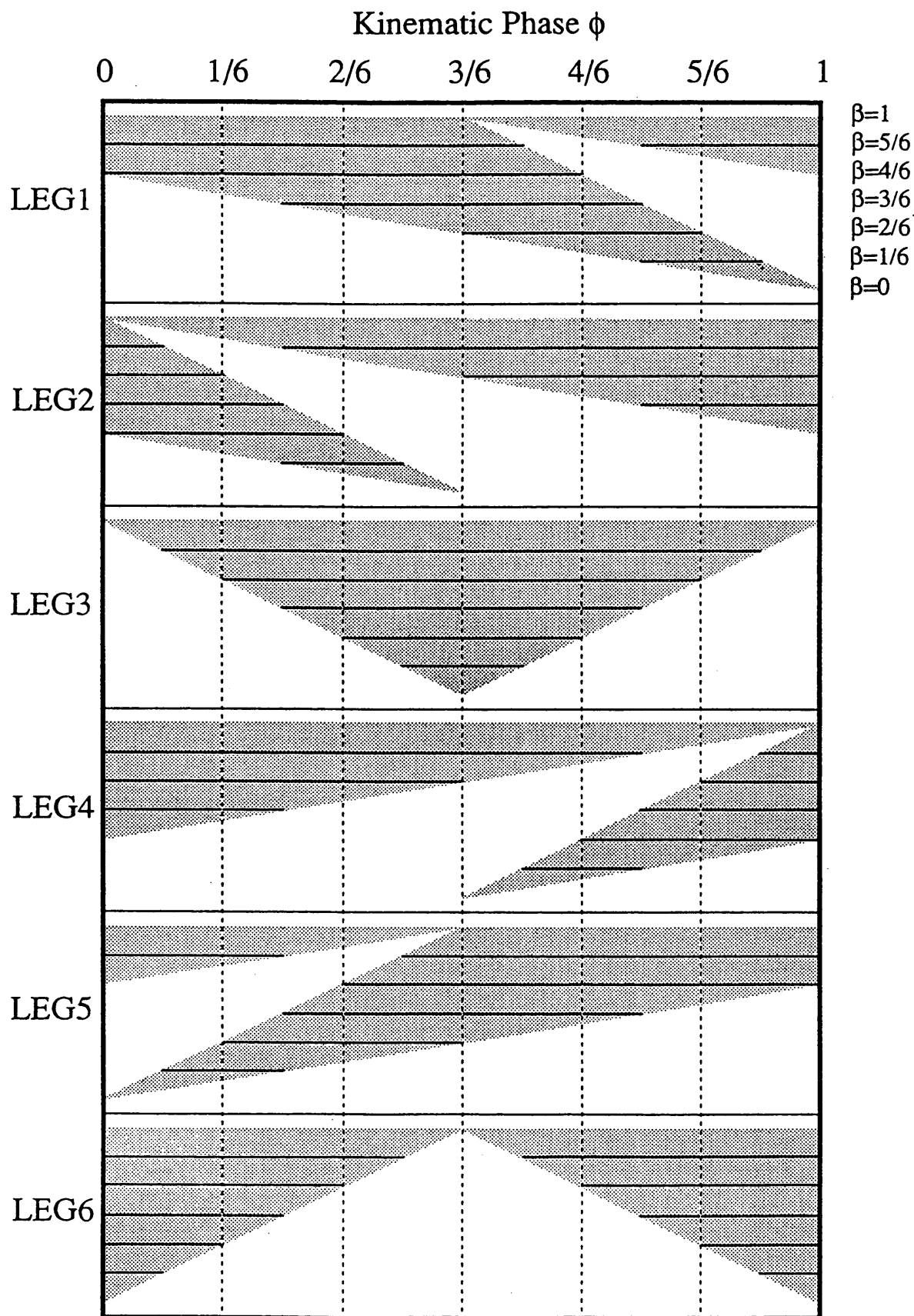


図-4.5 側行角 $\alpha = \pi/6$ 固定で導出されたウェーブ歩容の歩容線図 (斜線部は支持脚相)

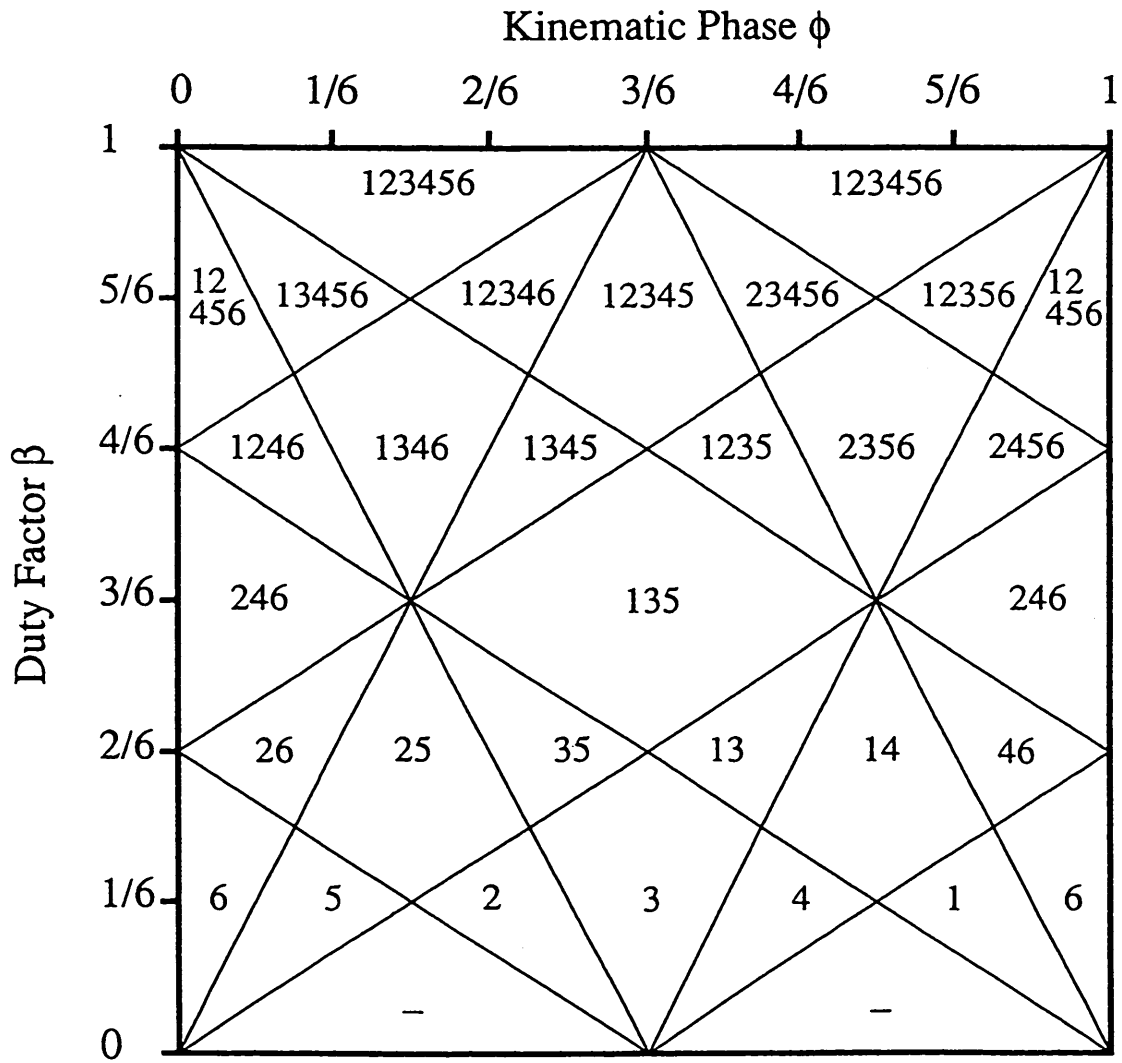


図-4.6 導出されたウェーブ歩容の支持脚の組合せ($\alpha = \pi/6$)

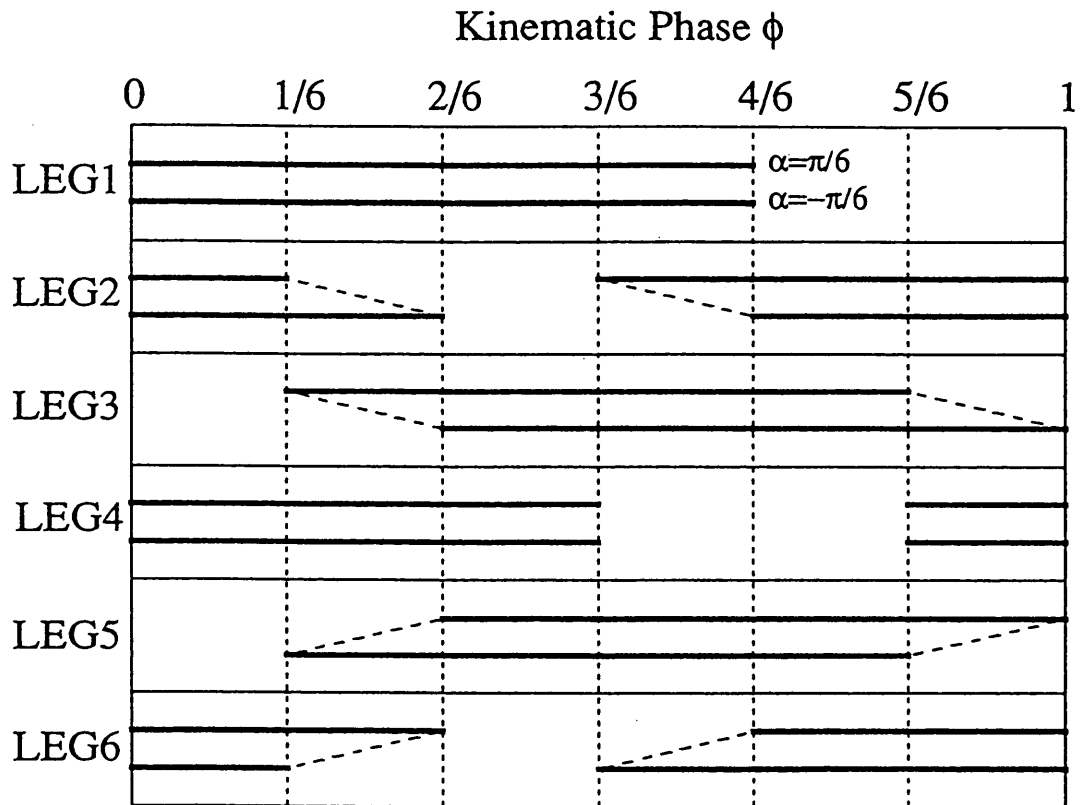


図-4.7 α の内挿によって得られたウェーブ歩容の歩容線図 ($\beta = 2/3$)

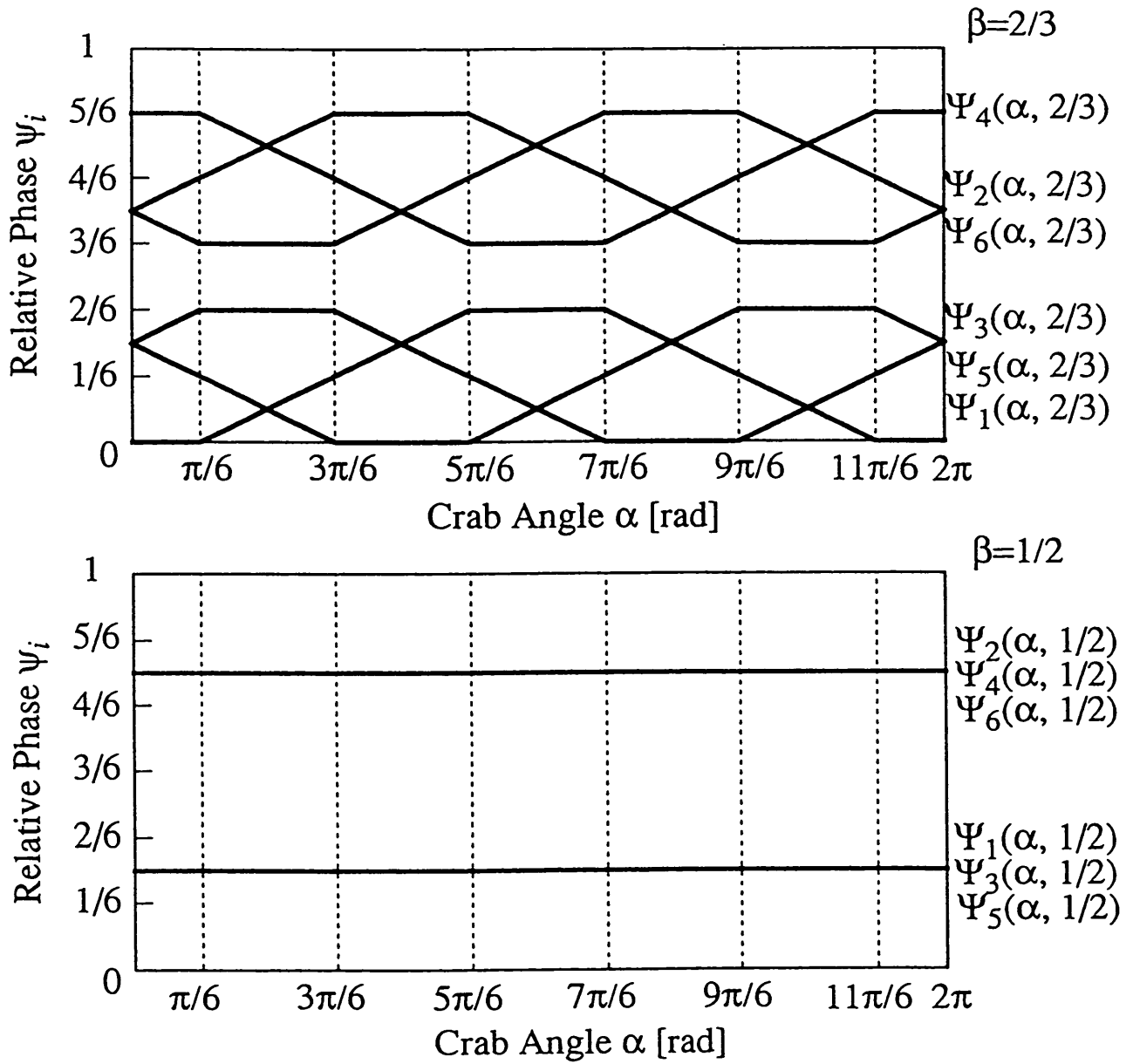


図-4.8 側行角可変時の脚位相差

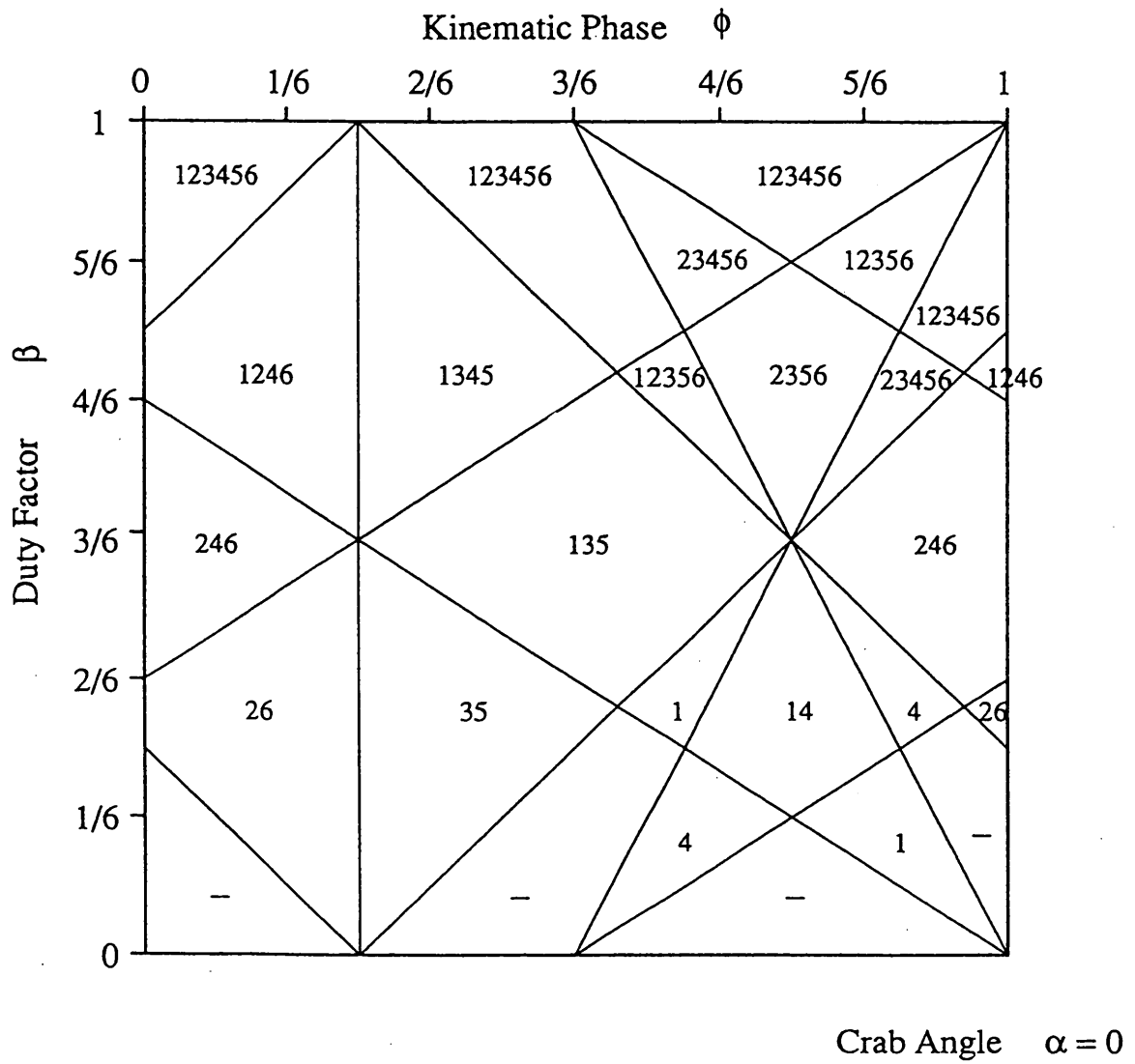


図-4.9 導出されたウェーブ歩容の支持脚の組合せ ($\alpha = 0$)

項(1)の結果を用いる。式(4.15)の $\pi/6$ を α に置き換えることで次式を得る。

$$\Psi_i(\alpha, \beta) = \left[6 \left\{ \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \Psi_i \left(\alpha, \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \Psi_i \left(\alpha, \frac{1}{2} \right) \right\} \right]_{\text{mod} 1} \quad (4.18)$$

この式が任意のデューティ比及び側行角に対して、常に前方ウェーブ歩容が実現される拡張ウェーブ歩容である。図-4.8に側行角可変時の脚位相差，図-4.9に側行角 $\alpha=0$ のときの歩容チャートを示す。

4.4 拡張ウェーブ歩容アルゴリズムのシミュレーション

(1) 歩容生成

図-4.10に拡張ウェーブ歩容を用いた歩行シミュレーションを示す。●は支持脚，○は遊脚を表す。この図では，胴体速度は0から線形に加速している。加速に伴って歩容線図(gait diagram)の線分が短くなっており，胴体速度の増加に伴ってデューティ比が減少する様子が分かる。

さらに，図-4.11も拡張ウェーブ歩容を用いた歩行の様子の一例である。この図では，ロボットは時計まわりに円軌道上を一定の方位を保ったまま移動している。各ドットは，ロボットの胴体中心の位置であり，ロボットモデルは，重ならないように外側に広げて描かれている。胴体速度の増加に伴って支持脚数が減少する様子が分かる。また，これは円軌道上を胴体の方位を保ったまま進んでいるため，側行角が常に変化する全方向型運動に相当する。遊脚の組合せが進行方向と共に変化する。脚の引き上げ動作のウェーブの方向が進行方向に沿っているのが分かる。つまり，常に前方ウェーブ歩容を実現している。

この歩容アルゴリズムは，さらに複雑な動作を扱うことができる。図-4.12は，3.2節で述べた自律ロボットのために開発されたMMLシステム¹³⁾からの入力を受けた歩容アルゴリズムの結果である。この例では，並進運動は曲率の導関数が連続という意味において，滑らかな曲線である。

(2) 安定余裕

ここでは，安定余裕(stability margin)は比 C/D で表す。ここで， C はロボットの胴体中心を水平面に投影した点と支持脚によって形成される多角形の辺との最短距離である。また， D は，胴体中心の地面からの高さである。図-4.13は，軸対称型の6足歩行ロボットの安定余裕のシミュレーション結果である。3通りの歩容をシミュレーションしている。まず，実線は拡張ウェーブ歩容で，胴体正面方向を一定のまま円弧上を歩行した場

合である。つまりこの場合，側行角が連続的に変化している。二番目の破線は $\alpha=\pi/6$ の時の拡張ウェーブ歩容の安定余裕である。これは，従来の固定方向のウェーブ歩容に相当する(破線)。三番目の点線はウェーブ方向固定の後方ウェーブ歩容である(点線)。側行角可変，固定の場合の安定余裕は，ほぼ同等であるといえる。拡張ウェーブ歩容の安定余裕は，後方ウェーブ歩容のそれと比較して，大幅に良好である。この考察は，左右対称(longitudinally symmetric)脚配置のロボットの縦安定余裕(longitudinally stability margin)の証明と一貫性がある⁹⁾。

5. 脚先軌道の生成

5.1 遊脚相

(1) 予測着地点の計算

本項では，脚先軌道計算に必要な予測着地点(predicted foothold)の計算法について述べる。脚*i*について，遊脚期間を正規化した遊脚相変数(transfer phase variable) ϕ_{Ti} を導入する¹⁰⁾。この変数は，0で脚先の地面からの離脱を，1で着地を表す。

遊脚軌道の設計には，着地点の位置情報が必要である。着地点は次のように求められる。歩行中の脚先の到達可能範囲は胴体とともに移動するため，胴体の移動速度が大きいほど歩幅を大きくとることができる。脚の上下にかかる時間を考慮すれば，胴体の移動速度が大きいほど歩幅を大きくとることが有利であると考えられるので，着地点は脚先の到達可能範囲内で可能な限り大きくとるように設定する。すなわち，遊脚相が1となる時点での到達可能範囲の端と現時点での到達可能範囲の中心から胴体の運動方向に伸ばした直線との交点を予測着地点 $P_{FH} = (p_{FHx}, p_{FHy}, p_{FHz})^T$ とする。

脚先軌道生成法の第一段階として，次の脚の着地すべき点を計算しなければならない。CWVは胴体の移動に伴って移動し，脚先はCWVの内側しか移動できないため，次の着地点はCWVの運動によって決められるべきである。ここで， ${}^B p_{Li} = (p_{Lix}, p_{Liy}, p_{Liz})^T$ を脚*i*の基準点(中心点)とし，これを式(3.14)に代入すれば，CWVの移動速度 ${}^W v_{Li} = (v_{Lix}, v_{Liy}, v_{Liz})^T$ が得られる。脚*i*の遊脚相変数が ϕ_{Ti} であるなら，遊脚相の残りの時間は $(1-\phi_{Ti})\tau_T$ である。したがって，遊脚相の終わりの時点($\phi_{Ti}=1$)では，CWVの中心点の x, y 座標は，

$$p_{Lix} + v_{Lix}(1-\phi_{Ti})\tau_T \quad (5.1)$$

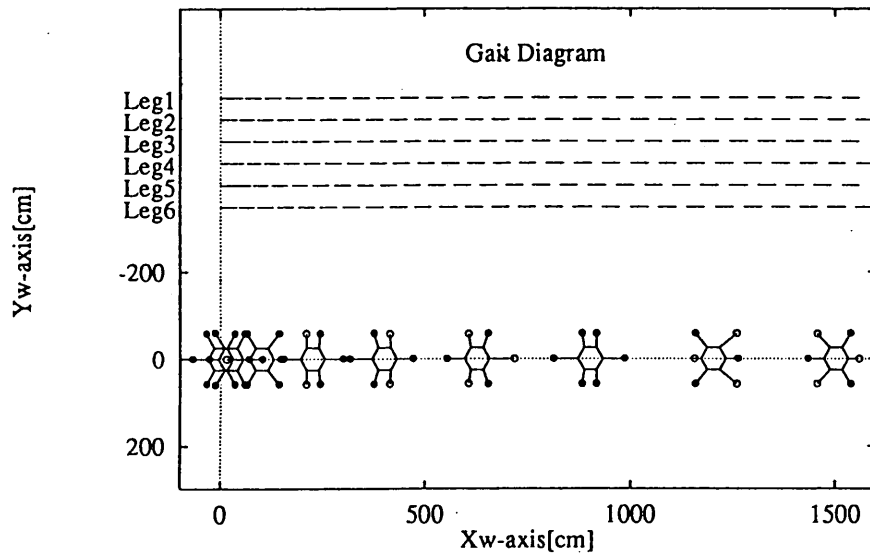


図-4.10 拡張ウェーブ歩容のシミュレーション

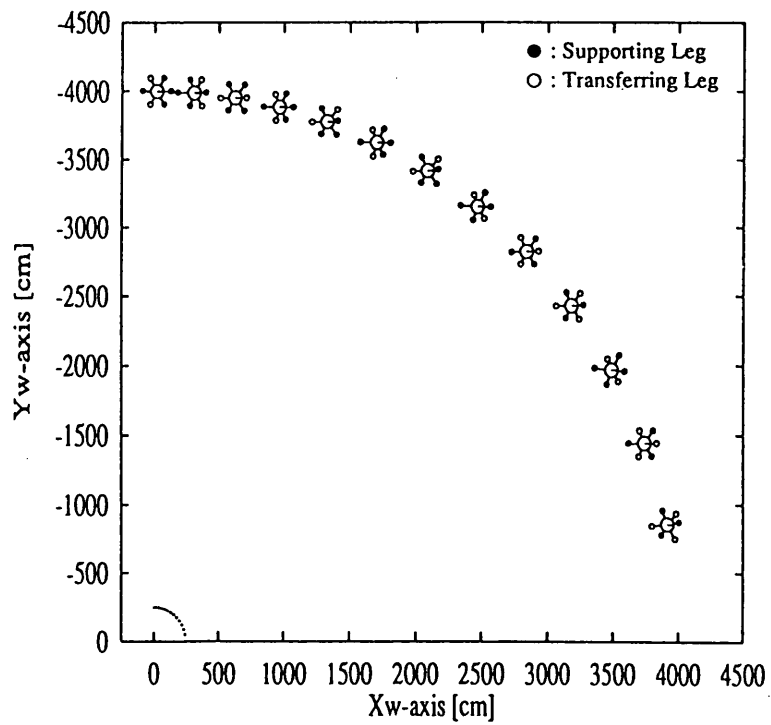


図-4.11 胴体方位一定で円軌道上を拡張ウェーブ歩容で歩行（ロボット歩行中に胴体速度は増加）

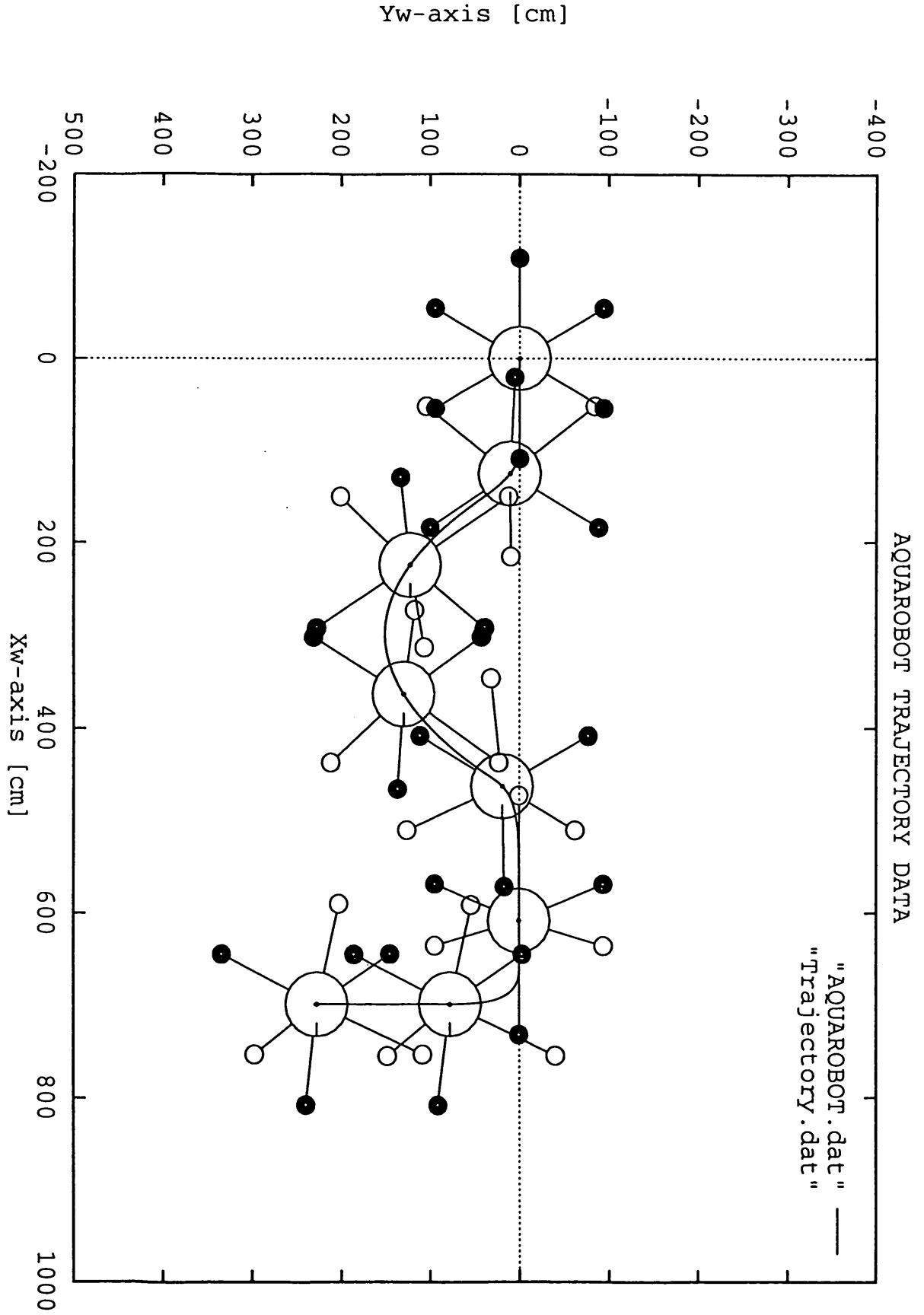


図-4.12 MMLを用いた拡張ウェーブ歩容のシミュレーション

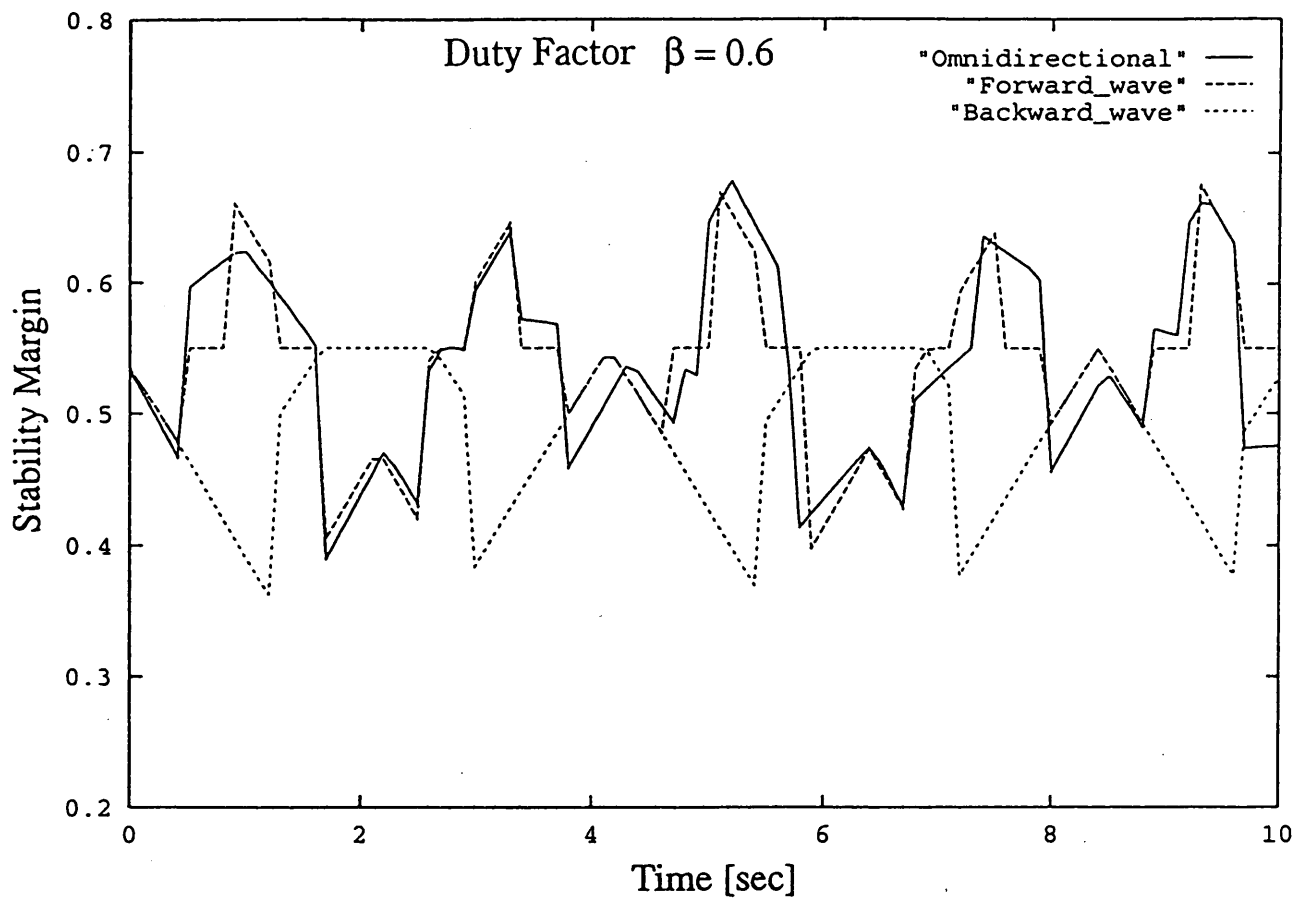


図-4.13 安定余裕の比較

$$\dot{p}_{Liy} + v_{Liy}(1 - \phi_{Ti})\tau_T \quad (5.2)$$

となる。ここで、予測着地点は、図-5.1 に示すように、CWVの端とCWVの中心点から ${}^W v_{Li}$ の方向へ伸ばした線との交点とする。したがって、予測着地点 ${}^W p_{FHi} = (\dot{p}_{FHix}, \dot{p}_{FHiy}, \dot{p}_{FHiz})^T$ は以下のように求められる。

$$\dot{p}_{FHix} = \dot{p}_{Lix} + v_{Lix}(1 - \phi_{Ti})\tau_T + d_{fore} \frac{v_{Lix}}{\sqrt{v_{Lix}^2 + v_{Liy}^2}} \quad (5.3)$$

$$\dot{p}_{FHiy} = \dot{p}_{Liy} + v_{Liy}(1 - \phi_{Ti})\tau_T + d_{fore} \frac{v_{Liy}}{\sqrt{v_{Lix}^2 + v_{Liy}^2}} \quad (5.4)$$

$$\dot{p}_{FHiz} = \begin{cases} H_l & \text{for } 0 \leq \phi_{Ti} < \phi_{top1} \\ H_g & \text{for } \phi_{top2} \leq \phi_{Ti} < 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

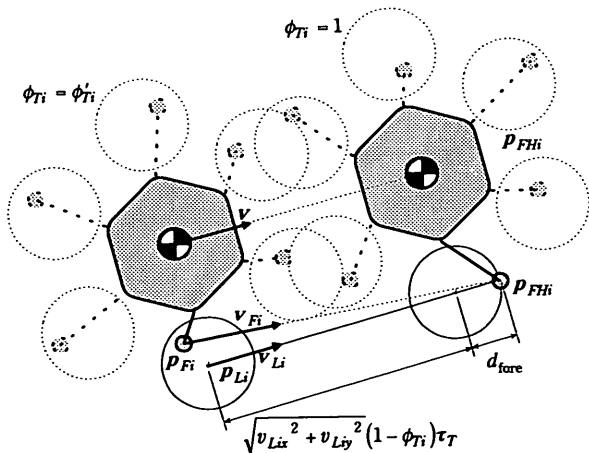


図-5.1 予測着地点の計算

ここで、 d_{fore} はCWVの中心から予測着地点までの距離、 ϕ_{top1} は足上げ高さ H_l に達するときの遊脚相変数であり、足下げ高さ H_d に達する時の遊脚相変数である。

(2) 脚先軌道の設計

本項では、脚先軌道の計画法について述べる。本アルゴリズムでは、胴体の運動指令を実現するような脚の運動計画がなされ、脚先軌道は脚先軌道平面と脚先速度で定義される。

a) 軌道テンプレート

脚先軌道は、この遊脚相変数の関数として図-5.2に示すように、軌道テンプレートと呼ぶ正規化した水平成

分と鉛直成分の足先速度 $\xi_H(\phi_{Ti})$ 、 $\xi_V(\phi_{Ti})$ で設定する。

$$\xi_H: [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (5.6)$$

$$\xi_V: [0,1] \rightarrow [-1,1] \quad (5.7)$$

脚先速度の水平成分 v_{Hi} と鉛直成分 v_{Vi} は、軌道テンプレートにそれぞれ、水平成分と鉛直成分の係数 V_{Hi} 、 V_{Vi} を掛けることで表される。

$$v_{Hi} = V_{Hi} \xi_H(\phi_{Ti}) \quad (5.8)$$

$$v_{Vi} = V_{Vi} \xi_V(\phi_{Ti}) \quad (5.9)$$

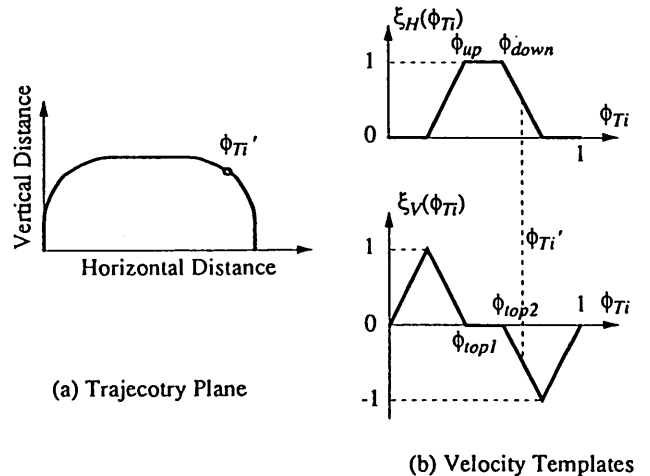


図-5.2 遊脚の脚先軌道生成

胴体運動指令は刻々と変化し得るので、脚先軌道もあらかじめ計画されたものを伸縮・屈曲させなければならない。この動的な軌道の伸縮・屈曲は係数 V_{Hi} 、 V_{Vi} を変化させることで可能となる。実際のアクチュエータが指令に追従して動作するには、水平・垂直成分の速度は滑らかで連続でなければならず、また、脚の離陸と着地の際には、スリップを避けるために脚先軌道は鉛直であることが望ましい。さらに、地面との着地の際に、衝撃を少なくして機構への影響を少なくするためには、速度を減速すべきである^{12,4)}。このようなことから、歩行機械の脚先軌道としては、軌道テンプレート ξ_H, ξ_V が $\phi_{up}, \phi_{top1}, \phi_{top2}, \phi_{down}$ について次のような条件を満たす必要がある。

1. $0 \leq \phi_{up} \leq \phi_{top1} \leq \phi_{top2} \leq \phi_{down} \leq 1$.
2. For any ϕ_T ,
if $0 \leq \phi_T \leq \phi_{up}$ or $\phi_{down} \leq \phi_T \leq 1$, then $\xi_H(\phi_T) = 0$.
3. For any ϕ_T , if $0 \leq \phi_T \leq \phi_{op1}$, then $\xi_V(\phi_T) \geq 0$.
4. For any ϕ_T , if $\phi_{op2} \leq \phi_T \leq 1$, then $\xi_V(\phi_T) \leq 0$.
5. For any ϕ_T ,
if $\phi_T = 0$ or $\phi_T = 1$ or $\phi_{op} \leq \phi_T$ or ϕ_{op2} , then $\xi_H(\phi_T) = 0$.

図-5.2は、上の条件を満たす軌道テンプレートの一例である。世界座標系において、この軌道は、図-5.2 (b) のようになる。

b) 脚先速度の計算

胴体の運動指令 Ω は、時々刻々と変化するため、予測着地点も時間的に変化する。それに応じて歩幅や脚先の運動方向、速度も随時変更されなければならない。この調整は、脚先速度の係数 V_{Hi} 、 V_{Vi} を変更することによってなされる。

d_{Ri} を脚先の現在位置と予測着地点との水平成分の距離とすると、式(5.10)で定義される。

$$d_{Ri} \equiv \sqrt{(\dot{p}_{FHix} - \dot{p}_{Fix})^2 + (\dot{p}_{FHiy} - \dot{p}_{Fiy})^2} \quad (5.10)$$

また、水平方向の着地点までの残りの距離は式(5.8)を積分することにより、

$$d_{Ri} = \tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 v_{Hi}(\phi') d\phi' = \tau_T V_{Hi} \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_H(\phi') d\phi' \quad (5.11)$$

したがって、水平成分の速度係数は、

$$V_{Hi} = \frac{d_{Ri}}{\tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_H(\phi') d\phi'} \quad (5.12)$$

となる。同様にして、鉛直成分の速度係数は、

$$V_{Vi} = \frac{|\dot{p}_{FHiz} - \dot{p}_{Fiz}|}{\tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_V(\phi') d\phi'} \quad (5.13)$$

となる。ここで、

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_{op1} & \text{for } 0 \leq \phi_{Ti} < \phi_{op1} \\ 1 & \text{for } \phi_{op2} \leq \phi_{Ti} < 1 \end{cases} \quad (5.14)$$

予測着地点に着地するには、脚 i の水平速度は方向余弦が掛け合わされる。したがって、脚 i の脚先速度は ${}^W \mathbf{v}_{Fi}$ で求められる。

$$\begin{aligned} {}^W \mathbf{v}_{Fi} &= \begin{bmatrix} v_{Hi} \frac{\dot{p}_{FHix} - \dot{p}_{Fix}}{d_{Ri}} \\ v_{Hi} \frac{\dot{p}_{FHiy} - \dot{p}_{Fiy}}{d_{Ri}} \\ v_{Vi} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\dot{p}_{FHix} - \dot{p}_{Fix}}{\tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_H(\phi') d\phi'} \xi_H(\phi_{Ti}) \\ \frac{\dot{p}_{FHiy} - \dot{p}_{Fiy}}{\tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_H(\phi') d\phi'} \xi_H(\phi_{Ti}) \\ \frac{|\dot{p}_{FHiz} - \dot{p}_{Fiz}|}{\tau_T \int_{\phi_{Ti}}^1 \xi_V(\phi') d\phi'} \xi_V(\phi_{Ti}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.15)$$

胴体に対する脚先速度 \mathbf{v}_{Fi} は、

$$\mathbf{v}_{Fi} = {}^B \mathbf{R}^W \mathbf{v} - {}^B \mathbf{v} - {}^B \boldsymbol{\omega} \times {}^B \mathbf{p}_{Fi} \quad (5.16)$$

となる。ここで、 ${}^B \mathbf{R}$ は世界座標系から胴体座標系への回転変換行列である²⁾。また、 H_l 、 H_g は、それぞれ最大脚上げ高さ、着地点高さであり、地形の状況に応じて適当な値に設定される。また、 τ_T は遊脚期間 (transfer period) を表す。この脚先速度に対して逆ヤコビアン演算が行われ、関節角速度が求められる。

5.2 支持脚相

連続的に変化する胴体の運動指令を実際に行うのは支持脚である。支持脚のスリップなどは無視し、世界座標系において静止しているものと仮定する。しかしながら、胴体は運動しているので、胴体から見た脚 i の脚先速度 \mathbf{v}_{Fi} は胴体を指令どおりに運動させるように動か

ねばならない。したがって、支持脚 i の脚先速度 v_{Fi} は以下ようになる (cf.式 (3.14))。

$$v_{Fi} = -{}^B v - {}^B \omega \times {}^B p_{Fi} \quad (5.17)$$

ここで、 ${}^B p_{Fi}$ は胴体座標系での脚 i の位置である。この脚先速度に対して逆ヤコビアン演算が行われ、関節角速度が求められる。

5.3 脚先軌道生成法のシミュレーション

(1) 運動学モデルによるシミュレーション

図-5.3は、本研究で提案された脚先軌道生成法のシミュレーション結果である。胴体の運動に応じて各脚の歩幅や速度が変化しており、脚先軌道が動的に生成されていることが分かる。また、図-5.4は、対地適応歩行が可能であることを示している。

左側はロボットを上から見た図である。このシミュレーションでは、胴体は円弧上を移動するものであり、胴体の向きと移動方向は同一である。右側は、それぞれの脚先軌道を横から見たものである。前節の軌道生成法により、軌道テンプレートは胴体軌道の外側と内側において、それぞれ伸縮していることが分かる。

(2) 動力学モデルによるシミュレーション



図-5.5 DynaMechs software packageを用いた
拡張ウェーブ歩容のシミュレーション

Naval Postgraduate Schoolによって開発されたロボットの流体力学効果も含んだ動力学モデルシミュレーションパッケージDynaMechs¹⁹⁾を用いてシミュレーションを行った (図-5.5)。このシミュレーションにおけるロボットのモデルは、アクアロボ2号機である。このシミュ

レーションにより、平地を想定したアルゴリズムでもロボットのサイズに比べそれほど大きくはない不整地であれば歩行が可能であることが確認できた。また、アクアロボ2号機による拡張ウェーブ歩容を用いた水中歩行の可能性が示された。

6. 歩行実験

6.1 アクアロボ制御システム

実時間ソフトウェアシステムの機能の概略及び構成について述べる。図-6.1に制御の流れを示した。各サイクルにおいては、次の一連の動作が実行される。

- 運動の指令は拡張MML言語¹⁹⁾ (軌道の指定にロボットの胴体方位の指定を加えたもの) によって行う。
- 運動の指令は拡張MML言語¹⁹⁾ (軌道の指定にロボットの胴体方位の指定を加えたもの) によって行う。
- 運動指令とロボットの状態が与えられたとき、各時点でのロボットの基準点の並進移動方向及び速度、回転移動速度を計算する。
- この3自由度から側行角とデューティ比を求めて、式(4.14)により脚位相を求め、歩容を決定する。
- 上記の歩容変数と脚先の接地センサを基に関節角を計算し、脚先運動を決定する。
- その駆動量を計算し、モータへ出力する。
- センサ情報及び運動指令を基に、新たなロボットの状態を算出する。

上記の主ループのサンプリング時間は25msecであり、実時間割り込みにより制御されている。また、各関節の駆動に必要なパルスの生成もこのサンプリング時間の間に実行される。この実時間制御プログラムはBorland C++3.0J~5.0Jで開発し、制御用コンピュータにはNEC社製PC-9821Xt及びXv20を用いた。

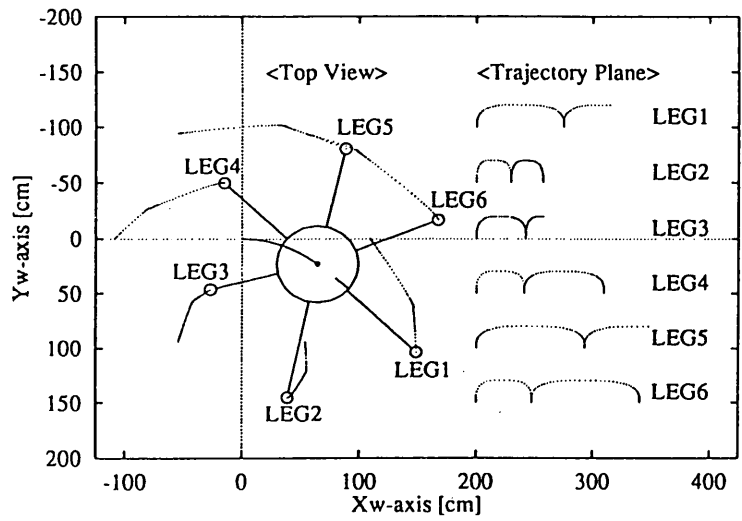


図-5.3 脚先軌道生成シミュレーション (円弧軌道)

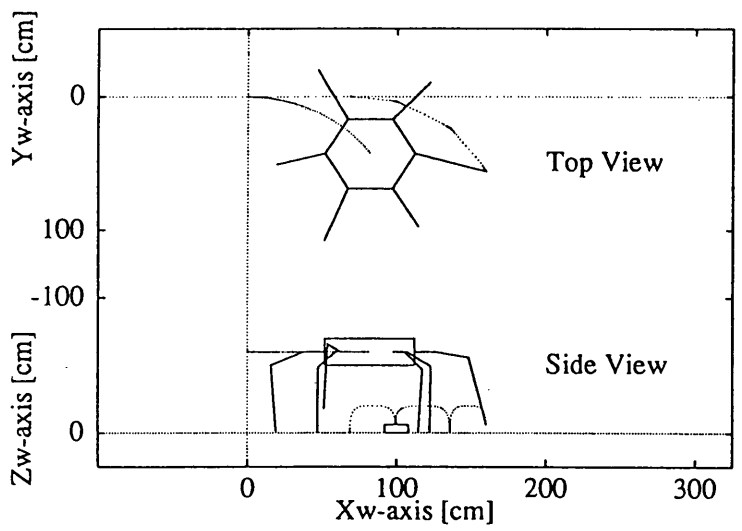


図-5.4 脚先軌道生成シミュレーション (凹凸面)

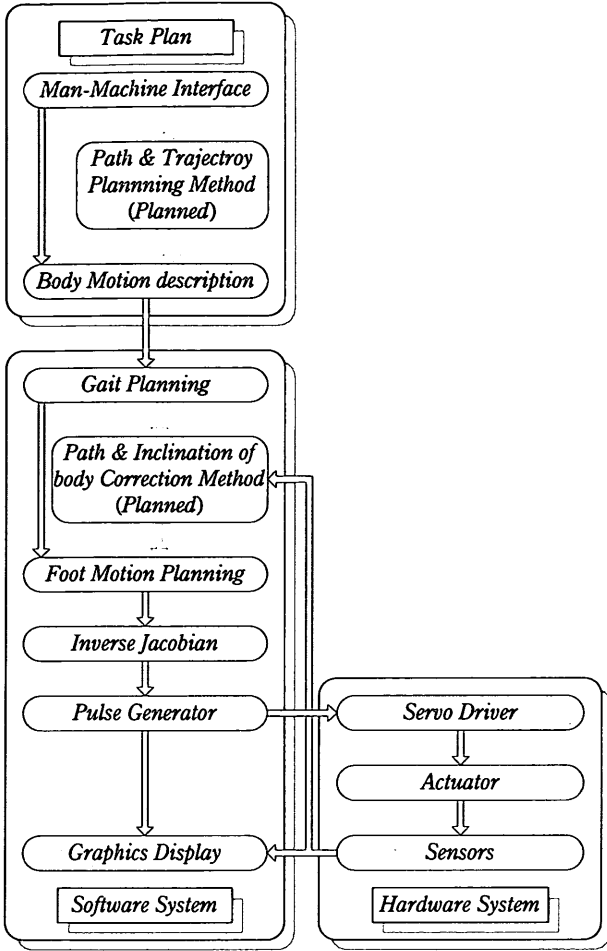


図-6.1 アクアロボット制御システム

6.2 アクアロボ1号機(陸上実験機)による歩行実験

(1) 平地歩行実験

写真-6.1に平地での歩行実験の写真を示す。

この写真は暗室においてランプを胴体上部と脚先に取り付け、カメラのシャッターを開放にして撮影された。この実験での胴体への指令は、胴体の姿勢を一定のまま半径1mの円弧軌道を追従するものである。したがって、側行角は常に変化して一周する間に360degの範囲で変化することになる。胴体の軌跡の接線方向の速度は、速度0から線形に数歩の間(30sec間)に8cm/secまで加速し、以降一定とした。したがって、デューティ比が1から徐々に0.65まで下げられた。このような指令に対してシミュレーションで示した結果と同様に、拡張ウェーブ歩容の生成、脚先の軌道生成が実現された。

以前の間欠トライポッド歩容による平地における歩行速度は12cm/sec¹⁰⁾であったが、本研究で適用した拡張ウェーブ歩容による歩行実験では、25cm/secの歩行速度を実現した。



写真-6.1 新アルゴリズムによる歩行実験

(2) 不整地歩行実験

写真-6.2に凹凸地形の歩行実験の写真を示す。この写真も前出の写真-6.1の写真と同様にして撮影された。段差は約8cmの高さがあるが、それ以上に脚上げ高さが設定されている。接地センサにより脚先の着地が検出されるとその脚は支持脚として運動が計画され、段差への適応がおこなわれる。この実験の結果、ほぼシミュレーション通りの歩行が確認できた。



写真-6.2 凹凸地形の歩行実験

写真-6.3は電球を1sec毎に点滅させたもので、速度の変化の様子がわかる。胴体への指令は、写真-6.1の実験と同様であり、細かな凹凸のある地形を歩行することができた。

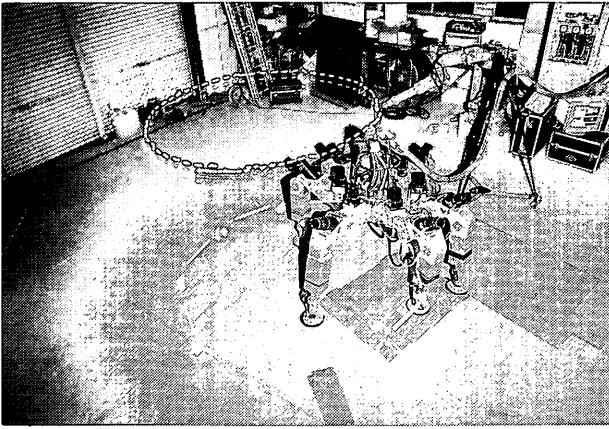


写真-6.3 凹凸地形の歩行実験

7. 結論

本研究では、軸対称型脚配置を有する6足歩行ロボットの歩行制御について、第3章で胴体運動の制御手法、第4章で従来のウェーブ歩容から導き出された拡張ウェーブ歩容について述べた。第5章では動的に着地点を決定し、周期歩容に一般的に適用することのできる柔軟な脚運動計画法を提案し、これらのアルゴリズムは、コンピュータシミュレーションによって動作が確認され、実機による歩行実験を行うことでその妥当性を検証した。

拡張ウェーブ歩容では、常に最大のデューティ比がとられる。つまり支持脚の本数が増えるような傾向を有するため、安定余裕を大きく保つような傾向を与えるといえる。また、側行角に対しても常に安定余裕の大きい前方ウェーブ歩容となるように計画されている。このアルゴリズムは他で4足歩行ロボットに応用されていたが、本研究において6足歩行ロボットに対して適用された。

すなわち、ここで提案した歩行アルゴリズムは、

- 拡張MMLを適用してロボットの行動計画の自由度を向上した。

- 歩行ロボットの胴体の全方向運動を可能とした。

- 滑らかな胴体速度及び側行角変化に対応して安定余裕を大きく保つ。

- 上述の胴体運動を実現する滑らかで接地点を動的に決定する脚先軌道生成法を提案した。

- 歩容を連続的に変化させることが可能であることをシミュレーションによって示した。

- また、それらが実現可能であることをアクアロボ1号機による歩行実験によって確認し、高い対地適応性、旧歩行アルゴリズムと比較して約2倍(25cm/sec)の歩行速度を実現した。

8. あとがき

今後の課題として、実用レベルの開発を行うにあたり、2次元誘導歩行時の軌道修正アルゴリズム及び胴体を傾けてのより大きな段差、不整地への対応アルゴリズムを検討する必要がある。これらは2次元誘導歩行の3次元への拡張として表現可能であろう。

また、さらに複雑で自由度の高いロボットの行動計画法を実現するためには、さらに上位の軌道生成アルゴリズムが必要であるが、本件に関しては報告予定である。

(1998年3月31日受付)

謝 辞

これまでアクアロボの研究・開発に携わり御助言、尽力頂きました多くの方々に厚く御礼申し上げます。特に、アクアロボの開発当初からその中心となり、今回の日米国際共同研究の立ち上げに尽力され、その素地を築かれた岩崎峯夫元機械技術部長(現(株)カイジョー)に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. Iwasaki, H. Takahashi, J. Akizono, T. Umetani, T. Nemoto, O. Asakura and K. Asayama: Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.26, No.5, December 1987, pp.393~422.
- 2) 朝倉修・秋園純一・岩崎峯夫・根本孝志: 歩行式水中調査ロボットの開発-(第2報)軽量防水型実験機の設計-, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.5, 1991年6月, pp.483~532.
- 3) H. Takahashi, M. Iwasaki, J. Akizono, O. Asakura, S. Shiraiwa and K. Nakagawa: Development of an Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.31, No.5, March 1993, pp.313~357.
- 4) S. Hirose, K. Yoneda, R. Furuya, and T. Takagi: Dynamic and static fusion control of quadruped walking vehicle, *Proc. IROS' 89*, Tsukuba, Japan, September 1989, pp.199~204.
- 5) R. Tomovic: A general theoretical model of creeping displacement, *Cybernetica* 1961, 1961, pp.98~107(English trans.).

- 6) R. B. McGhee: Some finite aspects of legged locomotion, *Mathematical Biosciences* 2, American Elsevier Publishing Co. Inc., 1968, pp.67~84.
- 7) R. B. McGhee: Vehicular legged locomotion, *Advances in Automation and Robotics*, vol.1, JAI Press Inc., 1985, pp.259~284.
- 8) S. M. Song and K. J. Waldron: Machines that walk: The adaptive suspension vehicle, *The MIT Press, Cambridge, Massachusetts*, 1989.
- 9) S. Hirose: A study of design and control of a quadruped walking vehicle, *Int. J. Robotics Res.*, vol.3, Summer 1984, no.2, pp.113~133.
- 10) W. J. Lee and D. E. Orin: Omnidirectional supervisory control of a multilegged vehicle using periodic gaits, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol.4, no.6, December 1988, pp. 635~642.
- 11) 日本ロボット学会編: ロボット工学ハンドブック.
- 12) 榊原・菅・細田・服部・藤江: 4脚歩行機構のための低衝撃足先軌道, 日本ロボット学会誌, vol.8, No.6, 1990年, pp.6, pp.662~671.
- 13) Y. Kanayama and M. Onishi: Locomotion function in the mobile robot language, MML, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991, pp.1110~1115.
- 14) K. Yoneda, K. Suzuki and Y. Kanayama: Gait planning for versatile motion of a six legged robot, *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, May 1994, pp.1338~1343.
- 15) K. Yoneda, K. Suzuki, Y. Kanayama, H. Takahashi and J. Akizono: Gait and Foot Trajectory Planning for Versatile Motions of a Six-Legged Robot, *Journal of Robotic Systems*, Vol.14, No.2, John Wiley & Sons Inc., 1997, pp.121~133.
- 16) C. Zhang and S. Song: A study of the stability of generalized wave gaits, *Mathematical Biosciences* 115, American Elsevier Publishing Co. Inc., 1993, pp.1~32.
- 17) K. Oohashi and K. J. Waldron: Stability of a six-legged walking machine with an axis-symmetrical leg configuration, *10th Applied Mechanisms Conference*.
- 18) 秋園純一: 歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の現地実験, 平成2年度港湾技術研究所講演会講演集, 1990年12月, pp.137~192.
- 19) S. McMillan, D. E. Orin and R. B. McGhee: DynaMechs: An object oriented software package for efficient dynamic simulation of underwater robotic vehicles, (J. Yuh, ed), *TSI Press*, 1994.
- 20) 小林幹雄・福田安蔵・鈴木七緒・安岡善則・黒崎千代子: 数学公式集, 共立出版, 1959.
- 21) J. J. Craig: Introduction to Robotics, *Mechanics and Control*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989. (邦訳: 三浦宏文・下山勲訳, ロボティクスー機構・力学・制御ー, 共立出版, 1991).

記号表

主な用語の定義と表記法¹⁾

- ・歩容 (gait): 足の浮かせ方の順序やそのタイミングなどについての歩くパターン。
- ・支持脚 (supporting leg): 地面の接地している状態にある脚。
- ・遊脚 (transferring leg): 地面から離れている状態の脚。
- ・支持脚相 (support phase): 脚が接地している状態。
- ・遊脚相 (transfer phase): 脚が空中にある状態。
- ・支持脚多角形 (support polygon): 支持脚の接地点を凸状に張った辺 (convex hull) で構成される凸多角形を水平面上に投影したもの。
- ・安定余裕 (stability margin) S : 水平面上で, 多脚ロボットの重心の鉛直投影点から支持多角形の辺までの最短距離。また, ある周期的な歩容に対し, 歩行周期中で最小値な安定余裕をその歩容の安定余裕という。
- ・静歩行 (static walk): 歩行ロボット全体の重心の水平面への鉛直投影点が, 常に支持多角形の内部を通過する歩行を静的安定 (statically stable) な歩行という。
- ・動的歩行, 準動歩行 (quasi-dynamic walk), 動歩行 (dynamic walk): 歩行中に静的安定性が保持されない時期が存在する歩行を動的歩行, 準動歩行という。歩行中静的安定条件がまったく満足されないで持続される歩行を動歩行という。
- ・側行角 (crab angle) α : 多脚ロボットの胴体の正面方向と, 実際に歩行推進している方向とのなす角度 ($-\pi < \alpha \leq \pi$)。
- ・デューティ比 (duty factor) β : 歩行の単位サイクル時間に対する脚 i の接地している時間の比率 ($0 < \beta \leq 1$)。
- ・歩行周期 (kinematic period) τ : 周期的な歩容においてその一周期にかかる時間。
- ・支持脚期間 (support period) τ_{Si} : 周期的な歩容において, 脚 i が支持脚である時間。
- ・遊脚期間 (transfer period) τ_{Ti} : 周期的な歩容において

て、脚 i が遊脚である時間。

- ・歩行位相変数 (kinematic phase variable) ϕ : 時間を歩行周期で正規化した変数 ($0 \leq \phi < 1$) .
- ・支持脚相変数 (support phase variable) ϕ_{Si} : 脚 i の支持脚である期間を正規化した変数 ($0 \leq \phi_{Si} < 1$) .
- ・遊脚相変数 (transfer phase variable) ϕ_{Ti} : 脚 i の遊脚である期間を正規化した変数 ($0 \leq \phi_{Ti} < 1$) .
- ・脚位相差 (relative phase) ψ_i : 第一脚の運動開始によって始まる脚の単位サイクル運動において、そのサイクル時間に対する脚 i が運動を開始するまでの時間の比 ($0 \leq \psi_i < 1$) .
- ・周期歩容 (periodic gait) : 周期的に決まった順番で脚の上下動が起こる歩容.
- ・対称歩容 (symmetric gait) : 脚の運動が左右で半周期ずつ位相がずれているような歩容.
- ・レギュラー歩容 (regular gait) : 全ての脚のデューティ比が等しい歩容.

次に記号の一覧を示す。ただし、この表に示されずに適宜出現箇所でも、定義されるものもある。ここで、ベクトルはボールドフォントで表し、左肩添字はそのベクトルが表現される座標系を意味する。行列の右肩の添字の -1 や T はそれぞれ逆行列、転置行列を表す。

β
 t_{Si}
 ϕ
 τ
 τ_{Si}
 τ_{Ti}
 ψ_i
 ϕ_{Li}
 ϕ_{Si}
 ϕ_{Ti}
 ξ_H, ξ_V

デューティ比 (duty factor)
 瞬時運動学余裕 (temporal kinematic margin)
 歩行位相変数 (kinematic phase)
 歩容周期 (kinematic period)
 支持脚期間 (support period)
 遊脚期間 (transfer period)
 脚位相差 (relative phase)
 脚位相変数 (leg phase variable)
 支持脚相変数 (support phase variable)
 遊脚相変数 (transfer phase variable)
 遊脚軌道テンプレート

記号	意味
t	時間
i	脚番号
X_W, Y_W, Z_W	世界座標系 (world coordinate system) 軸
X_B, Y_B, Z_B	胴体座標系 (body coordinate system) 軸
T	同時座標変換行列 (homogeneous transformation matrix)
R	回転座標変換行列 (rotation matrix)
u	胴体並進速度
v	胴体並進速度
ω	胴体回転速度
p_{Fi}	脚先位置 (foot position)
v_{Fi}	脚先速度 (foot velocity)
p_{FHi}	脚先予測着地点
p_{Li}	脚の基準点位置
v_{Li}	脚の基準点速度
H_B	基準胴体高さ
H_l	足上げ高さ
H_d	足下げ高さ
α	側行角 (crab angle)