人型2脚歩行ロボットの斜面歩行に関する研究

— ステレオビジョンによる斜度推定とその斜面歩行への応用 —[†]

熊谷 正朗*・江村 超*

Slope-Walk of a Human Type Biped Robot

— Estimation of inclination using stereo vision and its application to slope-walk —[†]

Masaaki KUMAGAI* and Takashi EMURA*

The bipedal walk is a useful method for moving in human live environment. However, there are few research works on biped robots on uneven ground though adaptability to those environments is necessary for them. In this paper, the slope-walk of a biped robot based on stereo vision is described. First, a method to estimate inclination with vision is proposed. This method is based on triangulation. The robot observes the ground in front of it at a certain angle below horizon and measures distance to there with stereo vision. This distance becomes smaller on uphill slope and larger on downhill way. The vision is also used for target detection for followed-walk. The robot detects distance and direction of a target. We propose direct utilization of parallax as distant information and direct conversion from parallax to inclination. These methods provide enough accuracy for walking robot and reduce cost of calculations and calibrations. Secondly, a sensor based walk is proposed. The sequence of walk consists of two parts. One is stabilization phase that absorbs attitude-disturbances of robot caused by environment or alteration of gait. This stabilization uses attitude sensors mounted on the body. The other is stepping phase. We designed simple gaits so that it can be altered easily for slope-walk and curve-walk. The experiments using a biped robot with legs of human type degree of freedoms and a stage that provides various slopes were carried out. The accuracy of slope estimation was about ± 1 [deg] and the walk through undulating ground of 5 [deg] downhill to 5 [deg] uphill way was achieved. The results showed that our method gains adaptability of biped robots to slopes.

Key Words: biped robot, attitude control, slopes, sensor-based control, stereo vision.

1. はじめに

2脚歩行は人間の生活環境に適したロボットの移動方法とされ、30年ほど前から研究が進められてきた¹⁾。近年は、アクチュエータの高性能化や、コンピュータ技術の発展にともない、2脚ロボットの性能向上が顕著である。

人間の住環境に適応性が高いのは、脚機構であるために不整地への適応性が高く、床面への投影面積が狭く小回りがしやすいためである。しかし、2脚歩行の研究は平地や平滑な段差、階段などに限られ、不整地への適応性が高いとはいえない状況である。2脚歩行を移動機構として考えるならば、不整地への適応性の向上が必要である。

以上の背景を踏まえ、不整地への2脚歩行の適応性を向上させることを目的として、本研究を開始した。その第1段階として、凹凸があり、斜度が変化するような路面や不安定な足場などで、足を任意の位置においた状態で直立姿勢を維持することの可能な制御則を提案した²⁾。本論文では、この姿勢制御則も一部利用し、歩行の継続とともに斜度の変化する路面である起伏地形での歩行を可能とする手法を提案する。

ロボットが起伏地形を歩行するには、斜面で歩行可能な歩容を持つことと、斜度情報を得ることの二つが必要である。本研究では前者のためにセンサ情報のフィードバックを主体とした外乱に強い歩行アルゴリズムを採用し、後者のためにステレオビジョンを用いた。斜度情報を得るための既存の研究では、ロボットの関節角や姿勢センサを取りつけた足により斜度を得る手法や³⁾、ロボット前方に路面への距離センサを取りつけることで、路面形状を測定した研究⁴⁾などが行なわれている。しかし、これらの方法は局所的な路面形状を測定するため、平滑な路面には適するが、局所的な凹凸がある場合は推定誤差が大きくなる。それに対して本研究では数歩単位の大域的な路面斜度を推定し、足の接地に影響を与える

[†] IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2000)にて発表。(2000・11)

* 東北大学大学院 工学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉 01

* Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai

(Received December 21, 2000)

(Revised July 2, 2001)

Fig. 1 Biped robot 'Monroe'

より局所的な部分は歩容のロバストさで補うこととした。

一般にステレオビジョンを用いる場合、両眼で確認した対象物の画面上での位置、およびその視差などを元に、カメラパラメータを用いて3次元空間での位置を算出する。しかし、本研究では両眼視差を直接使用することを提案する。直接使用しても歩行ロボットとしては精度的に問題がないほか、演算時間を短縮できる利点がある。さらに、ステレオビジョンのもう1つの活用法として、事前に教示した目標物を追尾して歩行する制御も実現したので、あわせて報告する。近年、歩行ロボットにステレオビジョンを搭載する例が目立つが、今回提案する制御手法等は、それらに容易に適用可能と考えられる。

本論文ではまず、使用したロボットシステムの概要と開発した歩行ロボット用ステレオビジョンシステムについて述べる。ついで、センサ情報に基づく外乱に強い歩行アルゴリズムを提案し、最終的にピッチ方向に起伏のある地形で歩行を行なった実験の結果を報告する。

2. 2脚歩行ロボット

まず、本研究で使用した2脚歩行ロボット“Monroe”(Fig. 1)の構成と、傾斜面を提供するために使用した可変傾斜歩行実験台について述べる。本ロボットは人間のような歩行動作を実現することを目的として1988年に製作されたものであり、身長1.2[m]、質量は約23[kg]である。人間の主たる自由度を有するよう設計されており、脚長は650[mm]、脚のリンク長は身長1.6[m]の人間とほぼ一致し、足も外見を考慮して比較的小型なものである。

2.1 ロボットのメカニズム

本ロボットの機構をFig. 1(b)に示す。股関節にピッチ・ロール・ヨーの3自由度、膝関節にピッチの1自由度、足首関節にピッチ・ロールの2自由度の能動関節を有する。股関節・足首関節のピッチ・ロールの自由度の駆動には、江村によるパラレルクランクスライダ機構⁵⁾を用いており、2自由

Fig. 2 Computer system for control of robot

度関節がコンパクトに構成されている。加えて、爪先には、蹴り出し動作の安定化を目的とした、ピッチ軸まわりの受動関節を設けた。よって、本ロボットは全体で能動12自由度、受動2自由度を有する。

ロボットの能動自由度は12個のDCサーボモータによって駆動されている。本ロボットは非自立型であり、モータドライバ・電源装置はロボット外部に設置され、ケーブルによって接続した。

2.2 ロボットのセンサシステム

本ロボットのセンサ系は大きく3系統からなる。これらは、姿勢センサ系、接地力センサ系、ステレオビジョン系である。ステレオビジョン系については、後に詳述する。

姿勢センサ系は2種5個のレートジャイロと2個の傾斜計からなる。レートジャイロは、“応答性はロボットに十分であるが、ゼロドリフトの大きいジャイロ”と“応答性は不十分であるが、ゼロ点の安定性、分解能に優れるジャイロ”の2種類である。ピッチ・ロール軸には両者を取り付け、合成ジャイロ⁶⁾を構成した。合成ジャイロとは、前者のジャイロから周波数の高い成分を、後者から低い成分をフィルタによって取出し、合成したものであり、結果的に“応答性がロボットに十分で、ゼロ点の安定した角速度信号”を有する角速度センサとなる。さらに、同様の手法でピッチ・ロール軸に取り付けた傾斜計の信号と合成し、応答性と絶対的な安定性を兼ね備えた姿勢センサ系を構成した。ヨー軸については後者のジャイロのみを装備し、相対的な回転角の計測を行なっている。

接地力センサ系は、足底に設置した計12個の1軸力センサからなる。センサは歪みゲージを利用した独自設計の薄型のもので、十分な応答性を有している。このセンサは爪先部に4個、踵に2個配置しており、爪先のみ接地した場合にも安定して計測できる。このセンサ信号を処理し、足底内での接地力の重心位置(片足あたりのZMP⁷⁾)と、足に作用している荷重を計測することが可能である。

2.3 ロボットの制御システム

ロボットの制御には3台のパーソナルコンピュータを用いた(Fig. 2)。1台がロボットの軌道計画、画像処理等を行なうマスタコンピュータ(Pentium II-400MHz)、残り2台はそれぞれセンサ情報の処理(i486DX2-66MHz)と、DCサーボモータの位置制御(i386-20MHz)を行なうスレーブコン

Fig. 3 Inclining stage for walking on slopes

Table 1 Specification of inclining stage

ピッチ傾斜範囲	-6 ~ +6	[deg]
ロール傾斜範囲	-6 ~ +6	[deg]
ピッチ最大傾斜速度	6	[deg/s]
ロール最大傾斜速度	12	[deg/s]
ベルト速度	20 ~ 300	[mm/s]
定格荷重	700	[N]

ピュータである。これら3台のコンピュータは共有メモリによって結合され、ロボットからのセンサ情報、モータ回転角指令などを授受する。スレーブコンピュータはMS-DOS上で単一のプログラムを稼働させ、処理を実行するが、マスターコンピュータではOSにLinuxを採用し、マルチプロセス(複数のプログラム)による制御システムを構築した⁸⁾。

2.4 可変傾斜歩行実験台

ロボットの歩行実験のために、任意の連続した傾斜面を与えることは容易ではない。そこで斜面を模擬するための装置として、Fig. 3に示す可変傾斜歩行実験台を開発した。

この装置は、ベルトコンベア下部にピッチ・ロール方向に傾斜可能なクロスジョイントを取り付け、前部の2本の垂直ドライブユニットとロッドで結合したものである。ベルトコンベアはロボットの長距離の歩行を可能とするもので、一種のトレッドミルである。本装置の仕様をTable 1に示す。人間の斜面上での応答も観察できるよう、荷重には余裕を持たせて設計した。

本実験台の制御は組み込み用CPU(日本電気(株)製V55)によって行なった。モータの制御・運動学演算を行なうとともに、専用のコントローラに斜度、ベルト速度を表示し、これらの指令値の入力を受ける。さらに別のコンピュータとシリアル通信によって接続することで、外部からの指令で斜度やベルト速度を変化させることも可能である。

本装置は急激な斜度の変化に対するロボットの応答を検証する実験²⁾や、今回のような連続した傾斜面の歩行実験に使用可能である。ただし、ロボットが斜面を歩行してもロボットの位置エネルギーは変化せず、また斜度の変化にともない若干の水平方向の加速度が発生する点で、厳密には実在の斜面とは異なる。そのため以下の実験では、ベルトおよび斜度を固定した状態でも歩行させ、実在の斜面においても制御が有効であることを検証している。

Fig. 4 Sample image obtained with stereo camera

3. ステレオビジョン

本節では、今回ロボット搭載用に開発したステレオカメラ、その画像に適用したテンプレートマッチング処理について述べ、ついで追尾歩行用の目標検出、斜度推定手法を提案する。

3.1 双眼同期ビジョン

ロボットにステレオビジョンを採用するにあたり、以下のような条件を設定した。

- 色情報を使用できるよう、カラーカメラとする。
- ロボットの頭部に取りつけるため、カメラの動きが大きいことを考慮して、シャッターを同時に切ることが可能なように、また、映像の処理が容易となるように、カメラの映像信号は同期させるものとする。
- ロボットに負荷とならぬよう、小型で軽量とする。
- 歩行ロボットは振動が多いため、故障した際にもローコストで交換できるようにする。

モノクロのカメラでは、外部同期可能なものが多くみられるが、小型・軽量で安価という条件に合う、カラーのカメラは入手できなかった。そこで、外部同期機能のない小型のカラーCCDカメラモジュールを採用し、その回路を改造することで、同期を取ることにした。

使用したカメラモジュールは松下電子工業(株)製CCDカメラモジュールBS7510である。このモジュールは1/3inch 25万画素のカラーNTSCカメラである。本来ホワイトバランス等は自動調整されているが、ステレオビジョンとして使用した場合に食い違いを生じないように、メーカー提供の資料をもとに、これらは固定した。

外部同期機能のないカメラ同士の同期を取ることは基本的に不可能である。しかし、CCDカメラは、特定のクロックを基準にロジック回路によって同期信号を生成しているため、クロックと、この生成回路を同期させれば、出力信号は同期する。そのための簡単な回路を付加し、完全に同期したNTSC信号を得た。多少の改造は必要であるが、このシステムはカメラも含めて低コスト(約3万円以下)で実現できる。

ついで、画像をコンピュータに取り込むために、2画像の1画面への合成を行なった。2個のカメラの画像を独立して

コンピュータに取り込むことが解像度の点から望ましいが、配線、取り込み、処理量等のコストと、解像度の有効性を考慮した結果、合成した上で取り込むこととした。ただし、コストは半分となるが、解像度は約 $1/\sqrt{2}$ となる。合成するには多数の画面分割法、およびカメラの配置法があるが、本研究ではカメラの光軸を同一平面内でほぼ平行に配置し、カメラを光軸回りに 90 [deg] 回転させた上で、画面を左右に分割した。2 信号が同期しているため、画像合成は信号の単純な切替のみで達成できる。本カメラによる取得画像例を Fig. 4 に示す。この画像において、左半分は 90 [deg] 反時計回りに設置した右カメラから、右半分は同時計回りの左カメラからの画像である。

3.2 テンプレート検索

取得した画像には、相関演算によるテンプレート検索を適用した。また、相関演算には次の正規化相関演算を使用した⁹⁾。

$$M = \frac{\frac{1}{N} \sum f_i g_i - \frac{1}{N} \sum f_i \cdot \frac{1}{N} \sum g_i}{\sqrt{V_f V_g}} \quad (1)$$

$$V_f = \left(\frac{1}{N} \sum (f_i)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum f_i \right)^2 \right) \quad (2)$$

$$V_g = \left(\frac{1}{N} \sum (g_i)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum g_i \right)^2 \right) \quad (3)$$

ここに、 f, g はそれぞれ大きさ N の画像輝度データ列である。検索においては特定のテンプレート g を用意し、カメラによる取得画像内の任意の同サイズの領域を f として切出し、相関値 M が最大となったところを検索結果とした。

さらに、カラーに対応させる拡張のために、

$$M = \frac{V_R M_R + V_G M_G + V_B M_B + V_Y M_Y}{V_R + V_G + V_B + V_Y} \quad (4)$$

で表わされる式で、相関値の重み付け平均を行なった。ここに、 M_R, M_G, M_B, M_Y は式 (1) によって計算される、画像の赤、緑、青、輝度 ($0.3R + 0.59G + 0.11B$) 成分ごとの相関値、 V_R, V_G, V_B, V_Y は式 (3) による成分ごとのテンプレート g の分散である。すなわち、特徴が明確に見られる色を重視するように重みを付けた。

本演算は、ソフトウェアで実装した。相関演算の繰返し演算部は PentiumMMX 命令¹⁰⁾を使用して実装し、RGBY 用の 4 演算を同時に実行することで、C 言語による実装に比較し数倍の高速化を達成した。

3.3 追尾歩行のための目標検出

ロボットを実用的なものとするために必要な要素の一つとして、追尾動作が挙げられる。教示された対象を検出し、その動きに従って移動することである。歩行ロボットでは追尾歩行を行なう例は稀であるが、本研究では、この追尾歩行を可変傾斜歩行実験台上でのロボットの連続した歩行を保障する目的で採用した。

目標を追尾するために必要な情報は、目標の方向と目標までの距離である。ステレオビジョンでこれらの情報を得る手

Fig. 5 Principle for estimating inclination of ground using stereo vision

Fig. 6 Detecting parallax on road in 3D space

法は一般的である。目標の方向は、事前に教示した対象物テンプレートを現在の画像内で検索して得ることが可能であり、今回実装したシステムでも右目の画像内で検索した。

つぎに目標物までの距離を得る。一般には、対象物を左右両カメラ画像で検出し、カメラのパラメータをもとに対象の位置を算出する。しかし、本研究では次の根拠により、この演算を省略する方法を用いた。第一の根拠は、画像上で目標物を検索する場合に、1 画素程度の誤差は避けられないことである。この 1 画素の誤差は演算結果に多大な影響を持つため、有効精度を考慮するとパラメータに基づく精密計算は実践上は重要ではない。第二の根拠は、適用対象が歩行ロボットであることである。歩行ロボットはそもそも離散的な移動をするものであり、静止対象に対して意図的に微調整をするのでなければ、細かな追尾距離を設定することが無意味である。現実的な用途では、追尾距離を正確な数値で指定することより、追尾対象を指示するときに概数で間隔を指定するほうが有用と考えられる。

以上の考察に基づき、本システムでは、右目画像で検出した対象物の近傍を新たにテンプレートとし、左目画像内で検出 (エッジ極線により拘束される狭領域に限定)、その両眼視差を求め、これを無変換で距離情報として採用した。追尾歩行を指令する場合は、対象物の画像と同時に視差で追尾距離を指定する。視差は距離に反比例的に単調減少傾向があるため、距離と一意の対応を取ることができる。提案の手法は精密な演算式も、手間のかかるキャリブレーションも不要 (指令時に同時に行なっているとも言える) なのにもかかわらず、歩行ロボットに十分な距離情報を与えることができる。

3.4 ステレオビジョンによる斜度推定

ロボットを斜面に対応させるためには、情報として路面の斜度が必要である。本研究では、ステレオビジョンによって斜度を推定する手法を提案する。本手法は一種の三角測量法

Fig. 7 Compensation that is needed when camera inclines

である。

具体的な検出手法を Fig. 5 をもとに説明する。ロボットは水平面に対して θ_E 下方に見える路面 C までの距離 l をステレオビジョンを用いて測定する。図より

$$\tan \theta_G = \frac{h - l \sin \theta_E}{l \cos \theta_E} \quad (5)$$

の幾何学的関係が成立し、視点の高さ h は既知であるため、距離 l より斜度 θ_G (斜度は登りを正、下りを負とする) が一意に求まる。ここで、 θ_E は、小さすぎる場合は交点 C が生じなくなり、大きすぎる場合は計測精度が悪化するため、C が常に存在する範囲で小さく設定するものとする。後述の実験では約 25 [deg] とした。

この推定手法においても、追尾目標検出と同じ考えのもと、視差を直接斜度に変換することとした。まず、C にあたる路面での視差を検出する。このために Fig. 6 に示すように、カメラ画像の画面下方のあるライン ($C' - C''$) に着目し、ライン上で数点を選んで、両眼視差を求める。これは Fig. 6 右下に示すような分布を持つ。画像の歪みなどにより結果に表われる凹凸は、事前に用意したテーブルにより除去し、路面でないところを観測したために有効な視差が得られない場所は、別途除去する (路面範囲を別の手法で限定する)。以上により得た、複数点での視差の平均値で l を代用した。

つぎにこの視差を斜度に変換する。あらかじめ、この手法によって、既知の斜度に対応する視差を求めておく。今回は斜度 ± 5 [deg] の路面で視差を測定することとした。これらを P_{G5}, P_{G-5} とおき、歩行中に得た視差を P_G として、斜度は次式による線形補間によって得るものとした。

$$\theta_G = -5 + 10 \frac{P_G - P_{G-5}}{P_{G5} - P_{G-5}}, \quad (6)$$

これにより視差から直接斜度を得ることができる。多項式曲線による補間も無論可能であるが、今回は 1 次補間で精度が十分であったため、この式を用いた。

さて、本手法によって斜度推定を行なう場合、大きな誤差が発生し得る要因として、視線方向である θ_E の誤差が挙げられる。本研究で用いているステレオビジョンでは、カメラがロボット本体に固定されており、ロボット本体と共に傾斜する場合が存在する。ロボットの姿勢は後述する手法によって制御するため、ロボット全体が両足首を通る直線を軸に傾く。

この影響を、Fig. 7 をもとに考える。この図はロボットが角度 θ_P だけ前傾した状態を示す。この時、路面斜度の真値 θ'_G は

Fig. 8 Experimental result of estimating inclination of ground

$$\tan \theta'_G = \frac{h \cos \theta_P - l \sin(\theta_E + \theta_P)}{h \sin \theta_P + l \cos(\theta_E + \theta_P)} \quad (7)$$

で求められる。厳密に l を算出する場合にはこの式を使用すれば良い。それに対して、本手法で直接得られるのは、ロボットの姿勢を考慮しない見かけの斜度 θ_G である。そこでまず、(7) 式を変形する。

$$\begin{aligned} \tan \theta'_G &= \frac{h \cos \theta_P - l(\sin \theta_E \cos \theta_P + \sin \theta_P \cos \theta_E)}{h \sin \theta_P + l(\cos \theta_E \cos \theta_P - \sin \theta_E \sin \theta_P)} \\ &\approx \frac{\cos \theta_P (h - l \sin \theta_E) - l \sin \theta_P \cos \theta_E}{l \cos \theta_P \cos \theta_E} \\ &= \tan \theta_G - \tan \theta_P. \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 θ_P は小さく、前述のように θ_E もそれほど大きくはないものとして、 $h \sin \theta_P \ll l \cos \theta_P \cos \theta_E$, $\sin \theta_E \sin \theta_P \ll \cos \theta_P \cos \theta_E$ とした。さらに、 $\tan \theta_G \tan \theta_P \ll 1$ として、

$$\begin{aligned} \tan \theta'_G &\approx \frac{\tan \theta_G - \tan \theta_P}{1 + \tan \theta_G \tan \theta_P} \\ &= \tan(\theta_G - \theta_P) \end{aligned} \quad (9)$$

を得る。すなわち、以上の近似条件のもとでは、視差から直接変換して得た θ_G より、斜度の真値 θ'_G を求めるには、ロボットの傾斜角 θ_P をただ減ずれば良いことが確認できる。実際には近似による誤差が若干生じるが、画像より得る θ_G により大きな誤差が含まれており、無視し得ると思われる。

以上の手法により、得られる精度を検証した。ここでは、ロボットを実験台上に直立させ、斜度の変化に応じて姿勢センサによって上体の鉛直を保つように姿勢制御を行なった²⁾。この状態で斜度を推定させつつ路面斜度を変化させた結果を Fig. 8 に示す。実線が斜度の実際値、階段状の破線が推定値を示し、もう 1 本はロボットの傾斜角である。推定結果に遅延が見られるが、斜度 0 [deg] の部分、上下のピークでの値、および形状は実際値とよく一致しており、遅延を除外すると誤差は ± 1 [deg] に収まっている。遅延の原因は処理時間と、突発的な誤差による急激な変化を避けるためのフィルタの影響である。歩行実験に使用する処理システムをそのまま使用したため、斜度推定自体は 0.1 [s] 以下で終了するものの、上に述べた目標検出処理も含み、全体の所要時間が長くなっている。

4. 歩行制御

本節では、センサ情報に基づいたフィードバックを行ない姿勢を安定化させた、外乱の許容範囲の大きな歩容の生成と、これを基本にした追尾歩行制御、斜面歩行制御について述べる。

4.1 基本制御

ロボットの全体の制御則を述べる前に、その前提となる基本的な制御則について本節で述べる。

4.1.1 ロボットの関節制御

本制御システムでは、主たる制御則はロボット上体を基準とした座標系において、両足首の位置および足底の法線ベクトル方向、足先のヨー軸まわりの方向を指定するものとした。すべてのサーボモータは個々に位置制御されており、このための回転角指令値(エンコーダカウント値)に変換する運動学演算が必要である。演算は足の位置指令値から関節角までの脚運動学と、関節角からモータ回転角までの関節運動学の2段階で行なった。

脚の運動学において、順運動学は脚の機構を基に直接的に求められる。それに対して逆運動学については、容易に算出可能なのは膝関節のみであり(股関節～足首関節間距離より算出)、残りの関節角は解析的に解くことは困難であった。そこで、順運動学演算を利用し、数値計算により解を得た。

関節の運動学において、膝ピッチ軸、股関節ヨー軸は単なるクランクスライダ機構であるため、直接演算が可能であるが、足首、股関節のパラレルクランクスライダ機構は演算が困難である。逆運動学は複雑であるが解析的に得られるものの、順運動学は解析解が得られない。そこで、この運動学演算には事前に数値計算で作成した2次元の変換テーブルを補間して用いることとした。数値上の変換精度は、関節の可動範囲全域にわたって0.01[mm]と十分に高い精度である。

4.1.2 接地力重心位置の制御

完全な平地のみを対象とする場合はすべての関節を位置制御とすることも可能と言えるが、足首関節に力制御を導入することで、局所的な凹凸に対応することが容易となる。本ロボットの関節機構であるパラレルクランクスライダ機構は、使用するボールネジの進み角が小さい場合に逆可動性がほとんどなく、足首関節はモータのトルクを操作することによる力制御は不可能であった。そこで、関節そのものは角度制御し、足底の力センサを利用したフィードバックにより力制御を行なうものとした。

関節の力制御を行なう場合、一般にはトルクを指令するが、本研究ではトルクを脚荷重で除した、接地力の重心位置(片足あたりのZMP)を指令値として制御を行なうこととした¹¹⁾。制御則としては、重心位置の目標値と現在値の差にゲインを乗じ、足首関節の回転角速度としてフィードバックした。

実際の応答性を測定した例をFig. 9に示す。この例では、ロボットを直立させた状態で、接地力重心の目標位置を左右(z axis)・前後(y axis)にステップ状に20[mm]移動させた。

Fig. 9 Response of feedback control on center of gravity of grounding force

足は前後方向に長いので、前後方向の制御には周波数の高いノイズが多少見られるが、ほぼ指令どおり制御されていることが確認できる。また、応答性は0.1[s]程度であり、ロボットの制御に有効であった。

4.2 センサ情報に基づく歩容生成

本研究では、追尾対象の運動変化、路面斜度の変化に対応する必要がある。このため、動的モデルに基づいて歩容を用意する手法は使用せず、センサ情報に基づいた歩容とした。あらかじめモデルに基づき歩容を設計した場合、定常状態において歩行速度等の性能は高めやすいが、外乱や環境変化には弱い。そこで、歩行速度は犠牲にして、歩行の継続性を重視した制御手法を採用した。

制御は二つの部分からなる。一方は両脚支持期における姿勢安定化制御、他方は前進のための踏み出し動作である。本制御則の特徴は、踏み出し動作を状況に応じて変更しやすいように可能な限り単純化し、それにより生じる姿勢の乱れを姿勢安定化制御によって吸収するところにある。

姿勢安定化制御としては、上体に装備した姿勢センサの値をフィードバックする手法を用いた。両足首には上述の力制御を行ない、両足首を結ぶ軸まわりのロボットの傾斜角に比例した距離だけ足首から離れた位置に、接地力重心位置の目標を設定した(間接的な足首関節のトルク制御)。これにより、ロボット上体の姿勢を鉛直に保つようにした²⁾。足首関節が力制御であるため、多少(足の接地面内で10[mm]程度)の路面の凹凸を吸収可能である。両脚支持期にはこの制御を行ない、踏み出しのための準備を行なう。この制御はロボットの姿勢角の揺動、および足裏の力センサで検出した脚間の荷重の振動的な移動が小さくなったところで終了し、前進の指令があれば、踏み出し動作に移る。

踏み出し動作は体重移動と脚の運動からなる。これを単純化することで、歩容の変更を容易とした。体重移動は、支持脚とする足首方向に、両足首を結ぶ直線に平行に、ロボット上体を移動させるように両脚を駆動し、ロボットの重心が静的に支持足内に移動する前に脚の運動を急停止させることで行なった。これにより、動的に短時間で体重を移動すること

ができる。体重移動と同時に、ロボット上体が多少傾斜し、遊脚側の足は離地する。これに足の上昇を加えて遊脚状態を確保し、両足を前後にはほぼ等速に移動し、踏み出し動作とした。目標位置まで足を移動後、遊脚の接地を待ち、姿勢安定化制御に移行する。路面の状況や斜度推定の誤差により、踏み出し動作中に遊脚の足が路面に接する場合がある。この場合は姿勢を大きく崩すことを避けるため、脚の運動を即時停止し、姿勢安定化制御に移行することとした。そのため、ストライド、周期とも路面の状態によって変動する。

以上の手法により、外乱に強い歩行を実現できた。また、一步ごとに姿勢安定化を行なうため、一步単位で歩行の開始、停止が可能である。踏み出し動作は1[s]程度で終了するが、通常は安定化に最低でも2[s]程度を要するため、周期が長くなり、歩行は遅いものとなる。平地に限定した歩行では、ストライド約400[mm]、1歩あたり約4[s]の歩行を実現しているが、安定余裕を確保するためにストライドを短縮すると速度が低下する。本研究では、斜面を余裕を持って歩行可能な歩容として本手法を採用したが、速度に関しては改善の余地がある。

4.3 追尾歩行制御

上述の歩行制御に3.3節で述べたステレオビジョンによる目標検出を組み合わせ、追尾歩行制御とした。画像の取り込みは、最も姿勢の安定する踏み出し動作の直前とした。

追尾歩行には、ロボットの歩行速度の調整と、進行方向の変更が必要である。使用した歩行制御は歩行速度を指示することは出来ないが、歩行の開始、停止が任意に可能であり、目標との距離を保つためには歩行のオンオフ制御を行なうこととした。すなわち、設定された目標視差より目標上で観測される視差が大きくなった場合(距離が小さくなった場合)は歩行を姿勢安定化段階で停止し、画像処理を継続しながら視差が小さくなるのを待機し、その後歩行を再開する。

つぎに進行方向の変更は、歩行の単脚支持期に足のヨー自由度を用いることで行なった。右単脚支持期中に爪先を閉じ、左単脚支持期中に爪先を開く方向に足をまわすと、右への旋回動作が加わり、曲線歩行となる(逆も同様)。ヨー自由度の旋回量は、目標指示時に指定した、画面上での“目標が見えるべき位置”と現在確認されている位置の左右方向の差に定数(オーバーシュートせず、漸近する程度に選定)を乗じて決定した。この手法は歩行動作と独立に方向を変更するため、ロボットの姿勢への影響は避けられないが、姿勢の乱れは姿勢安定化制御で吸収される。

以上の制御により、ロボットの歩行速度以下のものを追尾できるようになった。

4.4 斜度推定に基づく斜面歩行制御

斜面を歩行するには、3.4節で述べた推定手法により得た斜度をもとに、歩容を変更すれば良い。ここでも単純に、推定された斜度の路面と平行に、支持脚、遊脚の足を移動するように歩容を変更するのみとし、それによる影響は姿勢安定化制御によって吸収した。

(a) Incline of robot and ground

(b) Motion of foot and approximate walking distance

Fig. 10 Experimental result of walking on undulating ground

ステレオビジョンによる斜度推定は、実験により誤差は ± 1 [deg]程度に収まることが確認されたため、歩行の許容範囲はそれ以上必要となる。斜度推定を用いず、斜度を直接指令した実験では許容範囲は ± 2 [deg]程度であったため、単に推定結果を歩容生成の情報とすることとした。

5. 実験

以上の制御則の有効性を確認するため、歩行実験を行なった。ここではその一例として、5[deg]の下りから、5[deg]の登りに斜度が変化する起伏地形を可変傾斜歩行実験台で模擬し、ロボットの歩行実験を行なった。歩行の目標ストライドは280[mm]と設定した。また、追尾目標は実験台の前方に設置した。

実験結果をFig. 10に示す。図(a)の上段にロボットのピッチ・ロール方向の傾斜角、下段に路面斜度の実際値と推定値を示した。図(b)にはロボット座標系で見た、ロボットの足の前後方向の移動量と、実験台のベルトコンベアの進行距離(およその歩行距離)を示した。この実験では途中で斜度推定に誤差が発生している。このとき、姿勢・歩容に影響が生じているが、歩行は保っている。それ以外の部分では周期的に歩行を継続していることが確認される。追尾歩行の有効性はこの図からは直接確認できないが、歩行の継続が間接的に実証している。ロボットの歩行そのものは直進性が不十分であり、10歩程度歩行するとベルトの左右に寄ってしまい、また歩行速度とベルト速度の不一致により歩行の継続は困難である。これに対し、この実験ではロボットが実験台前方の目標

と一定距離を保ちつつ、目標の方向に歩行しようとしたため、ロボットがベルトの中央に誘導され、歩行が継続された。

以上の結果から本制御則の有効性が確認できる。

6. おわりに

本報告では、斜度情報を与えられずに斜面を歩行するために、路面の斜度をステレオビジョンによって推定し、歩容に反映させる手法を提案し、実験によってその有効性を確認して、以下の結論を得た。

- 歩行ロボットに搭載可能な小型・軽量・低コストのステレオカメラを構築し、これによって得た画像をもとにした斜面歩行のための斜度推定手法を提案した。また、追尾歩行のための目標物検出を行なった。
- 本手法では、両眼視差を距離情報として直接利用し、斜度も視差から直接変換するものとした。これにより、歩行ロボットに必要な精度を確保しつつ、演算の簡略化を図るとともに、手間を要するカメラパラメータのキャリブレーション作業を不要とした。
- 両脚支持期における姿勢安定化制御則を重視した歩行制御則を構築し、追尾歩行のための距離の維持、方向修正、および斜面歩行のための歩容変更を容易とした。
- 全制御則を統合し、ピッチ方向に起伏のある地形を模擬した環境下で、自律的に斜度を推定し、歩容を変更しつつ、目標を追尾する歩行が可能であることを、実験によって確認した。

今後の課題としては、ロール方向の傾斜を含む起伏地形への対応と、今回は検討外とした歩行速度の向上が挙げられる。最後に、本研究の遂行にあたって、実験装置の製作に東北大学工学部の鈴木正俊技官の協力を得たこと、本研究の一部は文部省科学研究費補助金によったことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 江村, 酒井: 平衡機能をもつ2足ロボットの基礎研究, 第13回 SICE 学術講演会予稿集, 129/130 (1974)
- 2) Masaaki Kumagai and Takashi Emura: Attitude Control of Human Type Biped Robot on a Slope Whose Inclination is Varying, 1999 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Proceedings 471/476 (1999)
- 3) 山口, 木下, 高西, 加藤: 路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 14-4, 546/559 (1996)
- 4) 梶田, 谷: 実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御, 日本ロボット学会誌, 14-7, 1062/1069 (1996)
- 5) 平木, 江村, 荒川, 千田: 歩行ロボットの関節駆動に用いる並列クランクスライド機構 (第1報, 機構の運動学的解析), 日本機械学会論文集, 61-587, 3045/3050
- 6) 江村, 熊谷, 王, 郷古: 動歩行ロボット用レートジャイロのマルチセンサを用いた特性向上, 計測自動制御学会論文集, 35-1, 17/23 (1999)
- 7) M. Vukobratović 著, 加藤, 山下他訳: 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社 (1975)
- 8) 熊谷, 江村: 汎用 Linux によるロボット制御手法の提案—第1報 非 RT Linux による定周期動作の実現— —第2報 マルチプロセスによる2脚歩行ロボットの制御の実験—, 第17回 日本ロボット学会学術講演会予稿集 847/850 (1999)
- 9) 日立製作所: 画像処理コマンドドライバ IP5000/CD プログラミングマニュアル 第2版 (IP5-3-1001), 2/39 (1998)
- 10) Intel Architecture Software Developer's Manual Volume 1: Basic Architecture Order Number 243190, Chapter 8 Programming With the Intel MMX Technology, Intel Corporation (1997)
- 11) Masaaki Kumagai and Takashi Emura: Sensor-Based Walking of Human Type Biped Robot That Has 14 Degree of Freedoms, Mechatronics and Machine Vision in Practice (M²VIP 97), Proceedings 112/117 (1997)

[著者紹介]

熊谷 正 朗 (正会員)

2000年, 東北大学大学院機械電子工学専攻博士課程修了。同年東北大学大学院工学研究科助手。2脚ロボットに関する研究に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員。(工学博士)

江 村 超 (正会員)

1969年, 東北大学精密工学科博士課程修了。横浜国立大学機械工学科講師, 東北大学精密工学科講師, 助教授を経て, 85年教授。現在, 機械電子工学専攻において, メカトロニクスの研究に従事。日本機械学会, 精密工学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員。(工学博士)