学術・技術論文

高速画像安定化機構を用いた歩行機械の遠隔操縦性能向上に関する研究

倉爪　亮*　広瀬茂男*

An Experimental Study of Teleoperation System for Walking Robots Using High–speed Image Stabilization System

Ryo Kurazume* *and* Shigeo Hirose*

Walking robots have high adaptability for terrain variation, and thus, have been expected as effective moving platform on uneven terrain, stairs, forest, marshy surface, and on ice.

On the other hand, mobile robots that perform several hazardous tasks such as mine detection or the inspection of an atomic power plant are typically controlled by operators from distant places. For a teleoperation system, use of visual information from a camera mounted on a robot body is very useful. However, unlike wheeled vehicles, the camera mounted on the walking robot oscillates because of the impact of walking, and the obtained unstable images cause inferior operation performance.

In this paper, we introduce an image stabilization system for teleoperation of walking robots using a high speed CCD camera and gyrosensors. The image stabilization is executed in two phases, that is, the estimation of the amount of oscillation by the combination of the template matching method and gyrosensors, and change of the display region. Pentium MMX instruction is used for template matching calculation, and the estimated amount of oscillation is given in every 12 [msec]. Furthermore, developed image stabilization mechanism can be used an external attitude sensor from the visual information, and the damping control of the robot body while walking is also possible.

Experimental results showed stabilized images that eliminates the oscillation component are taken even when the robot moves dynamically or in long distance, and verified that the performance of attitude control using the developed image stabilization system is almost same as the case using an attitude sensor.

Key Words: Vision, Walking Robot, Teleoperation, Image Stabilization, Template Matching

1. はじめに

2脚あるいは多脚型歩行ロボットは，車輪やクローラを用いた無限軌道型移動ロボットと比較して，

（1）歩行面の不連続な変化にも柔軟に対応できる．
（2）足先接地位置が稼動範囲および安定性の条件を満たす範囲内で自由に選択可能である．
（3）障害物の跨ぎ越しが可能である．
（4）移動方向の変化よる接地面上での滑りが本質的に生じない．
（5）脚は作業アームとしても利用可能である．

などの特徴を有し，階段や荒地など不整地環境や森林や岩場などの障害物の多い環境，あるいは沼地や氷上などでの有効な移動作業プラットホームとして，今後活躍が期待されている．これまでにも歩行ロボットの適用例として，例えば森林での地雷撤去作業を想定した歩行ロボットシステムの開発 [1] や，火口急斜面を走行させ火口近傍の学術調査を行った例 [2] などが報告されている．

一方，災害現場や他の惑星上など，人間が到達困難な場所で人間に代わり様々な作業を行う移動作業システムは，移動ロボットの有効なアプリケーションの一つである．これらの移動ロボットには将来的には人工知能が搭載され，獲得したセンサ情報と世界モデルから状況に即した適切な行動計画を自律的に立案，選択できるようになるものと期待されるが，現在までに移動ロボットに対する実用的な知能システムは開発されておらず，当面は人間のオペレータによる遠隔操縦システムが利用されるものと考えられる．

さてオペレータからの遠隔操縦により移動ロボットを制御する場合，オペレータがロボット周囲の環境状態を的確に認識し高い操作性能を得るためには，ロボット本体に取りつけられたCCDカメラなどから画像情報を取得し，オペレータ側へ提示する機構が必要不可欠である．しかし脚型歩行ロボットは無限軌道型移動ロボットと異なり，歩行中に支持脚切り替えの不連続性に起因する衝撃のためにカメラが大きく揺動し，オペレー

原稿受付　1999年10月18日
*東京工業大学
*Tokyo Institute of Technology

タ側で安定した画像を得ることができずに操作性能が劣るという問題がある．これはロボット本体の制振制御によってある程度抑制することができるが，その能力には限界があり，入力画像から外乱による画像揺動成分を除去し，安定した画像をオペレータに提示する画像安定化機構 [3] [4] は，歩行ロボットの遠隔操縦システムには必要不可欠である．

歩行ロボットに対して画像安定化を行う手法としては，i）特殊なカメラ雲台 [5]〜[7] や可動レンズの利用，ii）画像処理による振動成分除去 [8]〜[13]，iii）ロボット本体の制振制御 [14]〜[16] が考えられる．i）は空撮用カメラや汎用ビデオカメラなどですでに実用化されているが，ロボット歩行時の一般的な最大角速度（約 100 [deg/sec]）でも使用可能で，かつ歩行の障害にならないような高速，小型，軽量な機構は見当らない．

そこで，我々は ii）および iii）の手法で画像安定化を実現することを目指し，まず小型角速度センサと汎用コンピュータによる画像処理を組み合わせた，軽量かつ高速な画像安定化機構を構築した．本機構は，角速度センサでおおよその画像安定化を行い，通信遅れやセンサノイズに起因する誤差成分をテンプレートマッチング法を用いた動きベクトル推定により，補正，吸収するものである．また画像取得に高速 CCD カメラを用い，画像処理にペンティアム MMX 命令を利用する [17] ことで，12 [msec] のスループットで安定化画像が出力可能となった．これは従来の NTSC 信号を用いたビジュアルサーボシステムの約 3 倍の処理速度であり，本機構により画像処理による画像安定化のみならず，姿勢センサとほぼ同等の性能で視覚情報から歩行ロボットの姿勢推定および振動抑制が可能となった．

本論文の構成は以下のようになる．まず第 2 章で開発した画像安定化のための機構と手法を説明し，第 3 章で歩行ロボットを用いた画像安定化実験の様子を紹介する．さらに第 4 章では構築した画像安定化機構を歩行ロボットの姿勢推定に利用し，歩行時の本体姿勢の制振制御実験を行った結果を示す．

2. 画像安定化のための機構と手法

2.1 歩行ロボット遠隔操縦システム

Fig. 1 に示す 4 足歩行ロボット TITAN–VIII に高速 CCD カメラ（ES310，Kodak 製），Pentium 200MHz ボード（PCI–586HV，JDS 製），AD/DA ボード，Ethernet カード，シリコンディスク，3 軸姿勢センサ（MAXCUBE，日本航空電子製），角速度センサ（ジャイロスター，村田製作所製）を搭載し，歩行ロボットの遠隔操縦システムを構築した．このロボットは 10 [msec] ごとに歩容計画ルーチンの実行と本体姿勢の制御，および歩行面形状の推定を行い，外部のコンピュータに接続されたジョイスティックにより TCP/IP を用いて遠隔操縦される．CCD カメラから得られた画像は，外部のコンピュータにより画像処理され，オペレータのヘッドマウンドディスプレー（Olympus, Eyetrek）に表示される．

搭載した高速 CCD カメラ（ES310, Kodak 社製）は，648 × 484 画素のプログレッシブ画像を最高毎秒 80 フレームで出力し，取得された画像は 12 [msec] ごとに画像処理ボード（MAXPCI, DATACUBE）を通してパーソナルコンピュータ（Pentium III, 600 MHz）のメインメモリに送られ，MMX 命令を用いた画像処理が行われる．

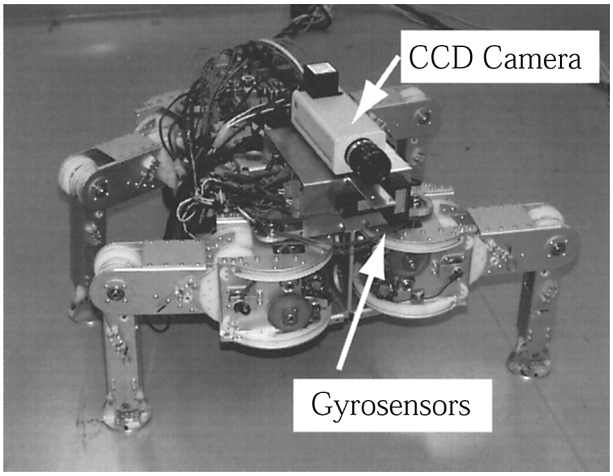

Fig. 1 4–legged walking robot TITAN–VIII

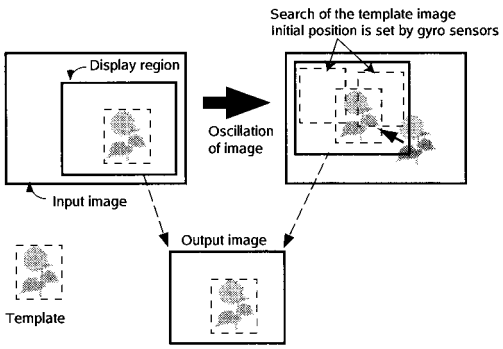

Fig. 2 Image stabilization system

2.2 画像安定化の手法

角速度センサとテンプレートマッチング法による画像処理を組み合わせた画像安定化の手法を **Fig. 2** に示す．これはまずある対象領域を設定し，入力画像上での対象領域の動きをテンプレートマッチング法で追跡する．ただしこのとき，前時刻での対応位置に角速度センサから推定される対応領域の移動変化量を加えた位置を探索領域の中心とする．次にその動きに合わせて，入力画像よりやや小さくとった画像表示領域を移動し，その領域の画像をモニタに出力する．これにより対象領域が静止した安定な画像を得ることができる．本手法は，角速度センサでおおよその画像安定化を行い，通信遅れ等に起因する誤差を実際の画像を用いたテンプレートマッチング法により補正，吸収するものである．テンプレートマッチング演算はパーソナルコンピュータで MMX 命令を用いて行われ，画像表示領域の変更は画像処理ボード（MaxPCI, Datacube）を利用した．実験の結果，テンプレートの大きさが 16×16 ピクセル，探索領域が近傍 10×10 ピクセルのときの 1 テンプレート当りの相関演算時間は 0.22 [msec] であり，画像 1 サンプリング時間（12 [msec]）内に 50 個のテンプレートを同時に追跡することができた．したがって追跡するテンプレートが 50 個以下であれば，画像の取得も含めた全体のスループットは 12 [msec] となり，これはロボッ

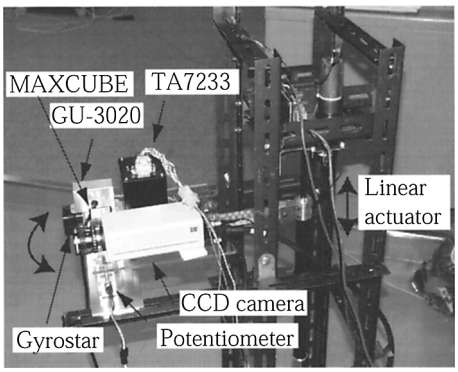

Fig. 3 Experimental system

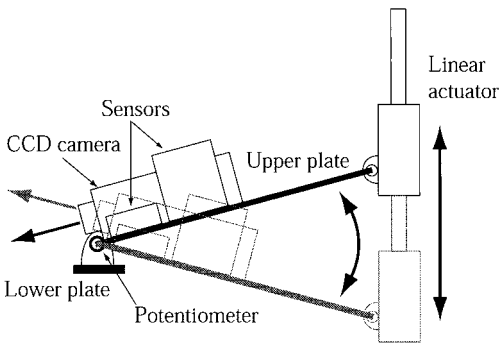

Fig. 4 Mechanism of experimental system

トのサンプリング周期である 10 [msec] にほぼ等しい.

2.3 姿勢，角速度センサおよびテンプレートマッチング法を用いた画像安定化制御

構築した画像安定化機構の有効性を確認するために，**Fig. 3**, **4** に示す実験装置を製作し，種々のセンサを単独あるいは組み合わせた場合の画像安定化制御実験を行い，それぞれの性能を比較した．本実験装置は，二つの板と両者の角度を計測するポテンショメータ，上板の一端を一定振幅，周期で上下動するためのリニアアクチュエータからなり，上板には 3 種類の姿勢センサ（MAXCUBE，日本航空電子製，GU–3020 データテック社製，および TA7233 多摩川精機製）と角速度センサ（ジャイロスター，村田製作所製）および CCD カメラが取り付けられている．

また実験は以下の 5 種類の手法に対して行い，上板を振動周期を変えて水平位置から ±5 [deg] の範囲で上下動させ，それぞれの画像安定化性能を比較した．

（1）姿勢センサを用いる．
（2）角速度センサを用いる．
（3）CCD センサにより得られた画像のテンプレートマッチング法を用いる．
（4）角速度センサと CCD カメラを用い，角速度センサにより推定した画面の移動方向に，テンプレートの探索領域を一定量（実験では 5 ピクセル）動かす．
（5）角速度センサと CCD カメラを用い，角速度センサにより推定した画面の移動量，移動方向に，テンプレートの探索領域を動かす．

Table 1 Comparison of stabilization methods

Method	Frequency [Hz]	Angular vel. [deg.sec]
1	oscillation is remained	
2	oscillation is remained	
3	1.5	47
4	3	94
5	4	126

実験の結果を **Table 1** に示す．ただし（3)〜(5）ではテンプレートの大きさは 16×16 ピクセル，探索領域は近傍 10×10 ピクセルであり，画面中央の一つのテンプレートを追跡した．このように（1),(2）とも，どの姿勢センサ，角速度センサを用いても振動をある程度抑制することが可能であったが，計測誤差や通信，演算時間の遅れなどにより，画像を完全に静止させることはできなかった．特に姿勢センサは振動周期が小さくなると，生画像よりさらに振動的になる場合があった．また（3）は最大角速度 47 [deg/sec] まではテンプレートを追跡でき，画像を完全に静止させることが可能であったが，これ以上の角速度ではテンプレートを見失うことが多かった．これに対して（4）は最大角速度 94 [deg/sec], (5）は最大角速度 126 [deg/sec] まで安定してテンプレートの追跡可能であった．

これらの結果,(5）の CCD カメラと角速度センサを組み合わせた手法が最も対衝撃性の高い画像安定化性能を有することが分かり，構築する画像安定化機構では本方式を採用することとした．

3. 歩行ロボットの遠隔操縦実験

構築した画像安定化機構の性能を確認するために，Fig. 1 に示す歩行ロボット遠隔操縦システムを用いて画像安定化実験を行った．

画像安定化の手順を **Fig. 5** に示す．実験では，あらかじめ画面を大きさ 16×16 ピクセルの 100 個の領域に分割し，まずそれぞれの領域で

$$\Sigma = \sum_{i,j \in s} \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial I_{i,j}}{\partial y}\right)^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される行列の固有値 λ_1, λ_2 を求め，これらがある閾値より大きな最大 50 個の領域をテンプレートと設定した [18]．次にそれぞれの領域の ±5 ピクセルの範囲で，取得画像とテンプレート画像の SAD（Sum of Absolute Difference）をペンティアム MMX 命令を用いて計算し，テンプレート設定時の初期位置と最小値（相関値）を示す位置との差を各テンプレートの動きベクトルとした．次に相関値がある閾値以下のテンプレートは信頼性が低いとして除外し，残った動きベクトルの平均値を画面全体の動きベクトルとして画面表示領域を変更した．

また，画像表示領域の変更量にある閾値を設定し，変更量が閾値以下であれば画像表示領域を変更して画像安定化を行い，閾値を越えた場合には画像安定化は行わずに変更量をその閾値に固定した．これにより，ロボットが例えば後述する **Fig. 15**

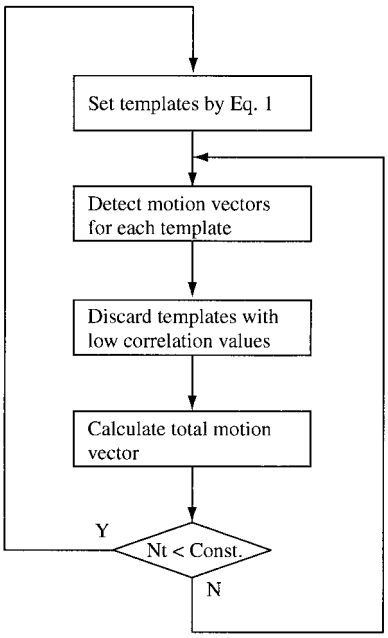

Fig. 5 Procedure of image stabilization

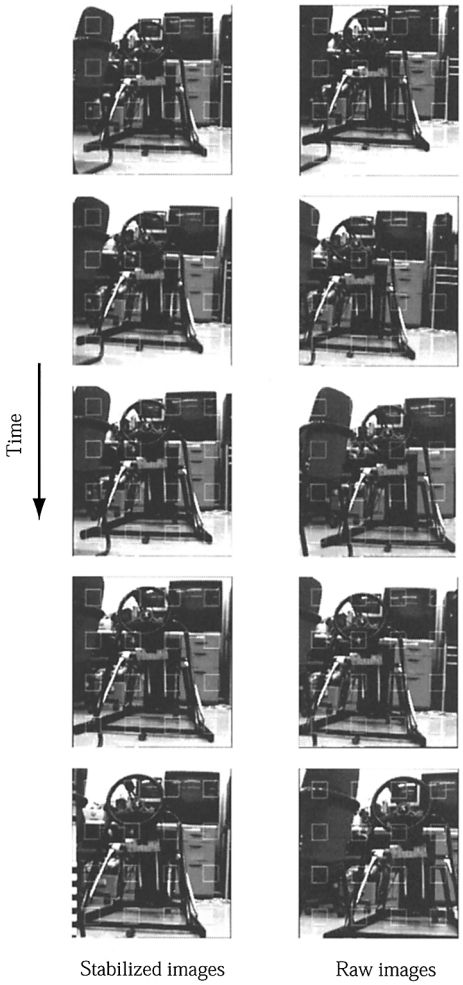

Fig. 6 Results of image stabilization

のような運動を行った場合，右旋回の開始直後は画像安定化機構により表示画像は静止しているが，変更量が閾値を越えた時点で左右方向の画像安定化は停止し，表示画像のシーンは滑らかに左に移動していく．一方，旋回開始前に選択されたテンプレートは旋回中次々と入力画面から外れるため，追跡可能なテンプレート数は次第に減少する．そこでこの追跡可能なテンプレート数がある一定量以下になった場合には，入力画像のすべての候補領域で新たにテンプレートを設定することにした．これによりロボットの長距離の移動や移動方向を変更した場合でも，次々と新たなテンプレートを選択して画像安定化を継続できる．またテンプレート更新後の画像表示領域の変更量の初期値として，更新直前の変更量を用いることで，テンプレートの更新前後でも滑らかな画像表示領域の変更を可能にしている．

TITAN–VIII に周期 10 [s]，デューティ比 0.85，速度 0.01 [m/s] のクロール歩容をさせ，構築した画像安定化機構の動作確認実験を行った．実験結果の一例を **Fig. 6** に示す．Fig. 6 の左側は画像安定化機構を用いた場合，右側は用いなかった場合の結果である．このように歩行の衝撃により右側のように入力画像が変動した場合でも，左側の画像では前方にある机やハンドルはほぼ視野中心で安定している．同様の実験の結果，ロボットの動歩行時や長距離の移動でも振動成分の除去された安定な画像を出力でき，構築した機構の有効性が確認できた．

4. 画像安定化機構を用いた本体姿勢の制振制御

構築した画像安定化機構は，テンプレートの移動量と焦点距離から CCD カメラの姿勢を推定でき，ロボット本体の外界姿勢センサとしても利用可能である．すなわち **Fig. 7** に示す座標系で，ロボット本体の並進速度，角速度をそれぞれ (V_x, V_y, V_z)，$(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ とすると，Z 軸上に置かれた画像平面上の点 (x, y) の速度 (u, v) は，

$$u = f\frac{-V_x + xV_z}{Z} + fxy\omega_x - f(1+x^2)\omega_y + fy\omega_z \quad (2)$$

$$v = f\frac{-V_y + yV_z}{Z} + f(1+y^2)\omega_x - fxy\omega_y - fx\omega_z \quad (3)$$

となる．ただし Fig. 7 で，Σ_B はロボット胴体座標系であり，それぞれの軸はカメラ座標系 Σ_C に平行であるとする．

さて，構築した画像安定化機構は単一のカメラを用いた二次元の画像処理であり，単体ではロボットの並進運動と回転運動の分離は不可能である．しかし歩行ロボットの場合，脚先と地面に滑りがなければ，脚の関節角度から本体の並進運動や回転運動を推定することは容易であり，これらの情報から並進運動と回転運動の分離，あるいは奥行き Z の推定も可能である [20] [24]．

また実験で用いた歩行ロボットの並進速度，角速度は最大でそれぞれ 0.01 [m/sec]，100 [deg/sec] であることから，並進速度に対応する成分 $\frac{V_x - xV_z}{Z}$，$\frac{V_y - yV_z}{Z}$ は Z が十分に大きければ実用上無視できる．そこで本論文では，テンプレートとして選択された対象が並進成分の影響が無視できるほど十分遠くに存在すると仮定し，式 (2),(3) の並進速度成分を無視することにした．

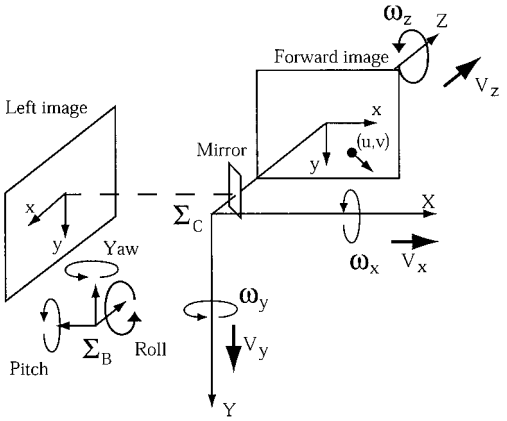

Fig. 7 Camera and robot coordinate systems

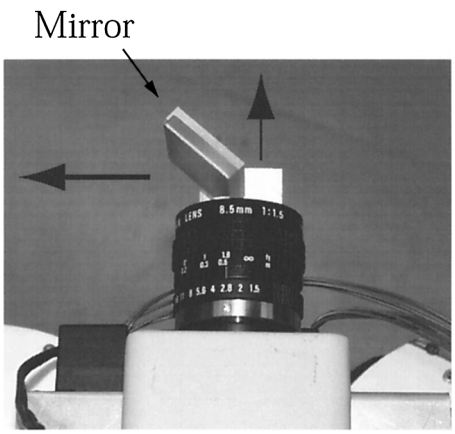

Fig. 8 Images splitting by a mirror

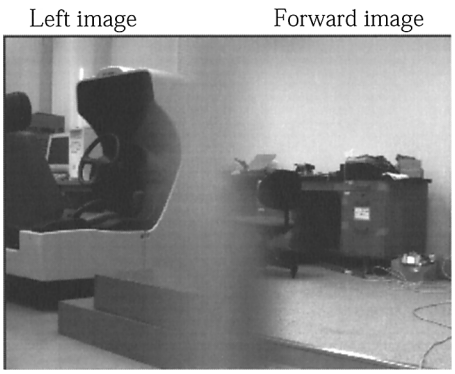

Fig. 9 Split images

これにより $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ は (u, v) の線形方程式となり，いくつかの点で (u, v) が測定できれば最小自乗法により $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ を決定できる．

しかし，このうち特に ω_z は測定誤差の影響を受けやすく，正確な推定は困難であることから，**Fig. 8**，**9** に示すように，カメラ前方にミラーを置き，画面左半分は本体左側の画像を撮影して，前項で示した方法により左側画像に対しても画像安定化を行うことにした．ここで Fig. 7 に示す左側画像上では，

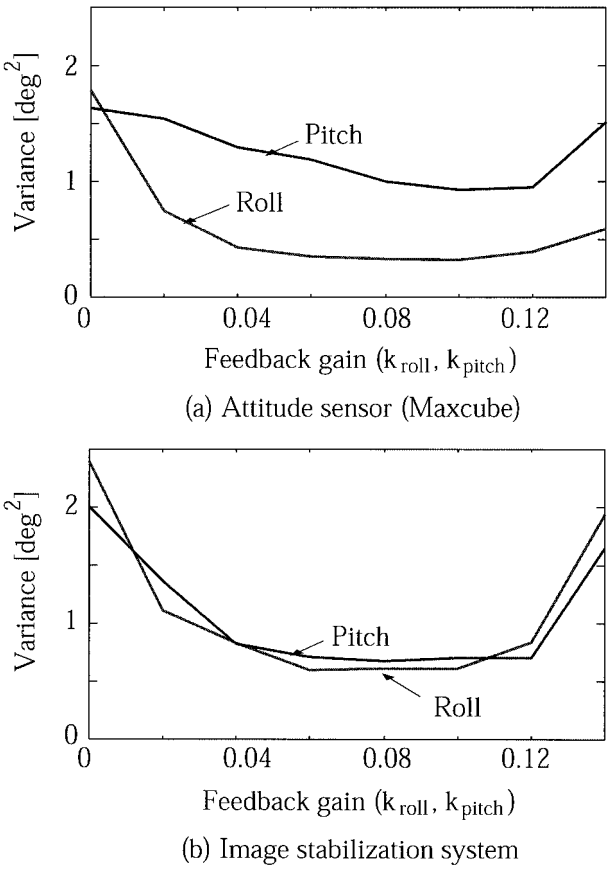

Fig. 10 Comparison of body damping control

$$u = f\frac{-V_z - xV_x}{X} - fy\omega_x - f(1+x^2)\omega_y + fxy\omega_z \quad (4)$$

$$v = f\frac{-V_y - yV_x}{X} + fx\omega_x - fxy\omega_y + f(1+x^2)\omega_z \quad (5)$$

となり，同様に並進速度に対応する成分を無視すれば $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ についての線形方程式が得られる．そこで画面左右の領域において前章で示した方法により数点を追跡すれば，これら四つの式を用いて最小自乗法により $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ が精度良く推定できる．

Fig. 10 に，構築した画像安定化機構および姿勢センサ（MAXCUBE，日本航空電子製）により推定された本体姿勢角を用いて，静歩行する 4 足歩行ロボットの本体姿勢の制振制御を行った結果を示す．図の縦軸は本体の姿勢分散値であり，横軸はフィードバックゲイン k_{roll}, k_{pitch} である．ただし制振制御は，ロボット本体の目標姿勢が $\phi_{roll,d}, \phi_{pitch,d}$，視覚，姿勢センサから推定された姿勢が $\phi_{roll,s}, \phi_{pitch,s}$ であるとき，ロボット本体に与える姿勢指令値 $\phi_{roll}, \phi_{pitch}$ を

$$\phi_{roll} = \phi_{roll,d} + k_{roll}(\phi_{roll,d} - \phi_{roll,s}) \quad (6)$$

$$\phi_{pitch} = \phi_{pitch,d} + k_{pitch}(\phi_{pitch,d} - \phi_{pitch,s}) \quad (7)$$

で与えることにより行った．これらの実験により，構築した画像安定化機構により，姿勢センサとほぼ同等の姿勢安定化性能が得られることが分かった．

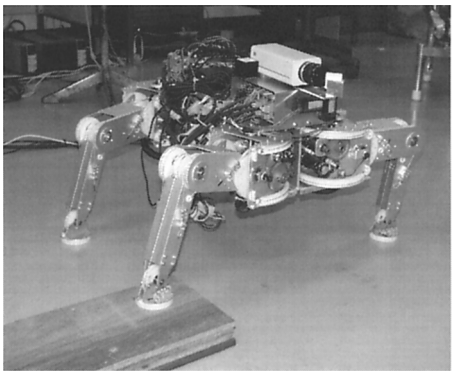

Fig. 11 Step climbing experiment

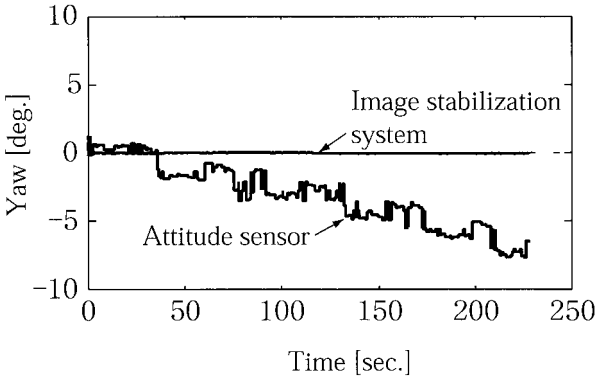

Fig. 13 Drift component of yaw angle

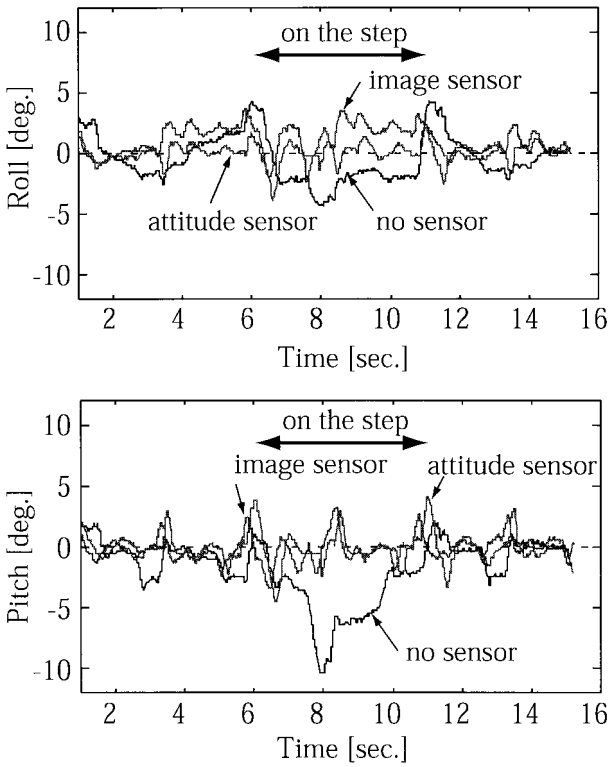

Fig. 12 Yaw angle of step climbing experiment

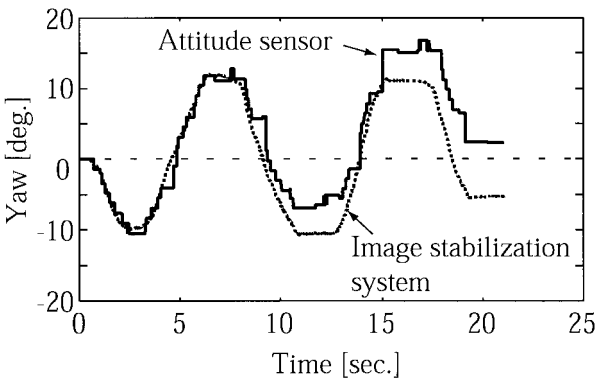

Fig. 14 Comparison of yaw angle measurement

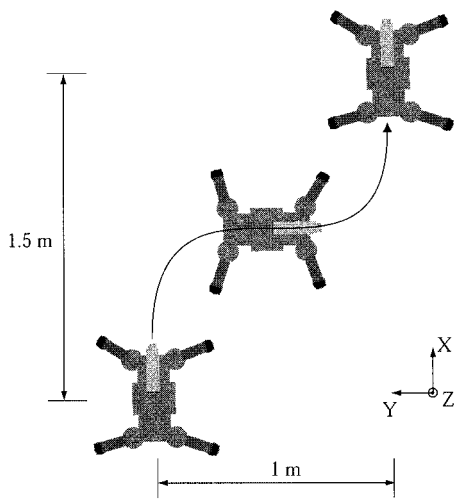

Fig. 15 Moving path of TITAN–VIII

また，ロボット前方に高さ 50 [mm] の段差を置き，右前足の接地点を段差上に設定して段差乗り越え時の本体姿勢の制振制御実験を行った．実験の様子を **Fig. 11** に，ロール，ピッチ軸回りの角度変化を **Fig. 12** に示す．実験の結果，ピッチ軸では画像安定化機構を用いた制振制御により，制振制御を行わない場合に比べて姿勢センサとほぼ同様の制振性能が実現できることが分かった．

さらに **Fig. 13** に，ロボット本体を静止させた状態での重力方向に垂直なヨー軸回りの姿勢角を示す．また同様に **Fig. 14** に本体をヨー軸回りに正弦波状に回転させた場合の結果を示す．両者とも，姿勢センサによる測定値にはドリフト項が存在するが，画像安定化機構による推定値にはそれが見られない．また **Fig. 15** に示すようにロボットを歩行させたときの，ヨー軸回りの姿勢角の変化を **Fig. 16** に示す．ただし Fig. 16 の実線はロボットへの姿勢指令値であるが，移動中に足先の床面との滑りがみられず，また移動開始時および移動終了時での実際の姿勢が姿勢指令値とほぼ一致したことから，この姿勢指令値は実現値に等しいと考えられる．これらの実験から，特にヨー軸回りの姿勢角は，構築した画像安定化機構により姿勢センサより

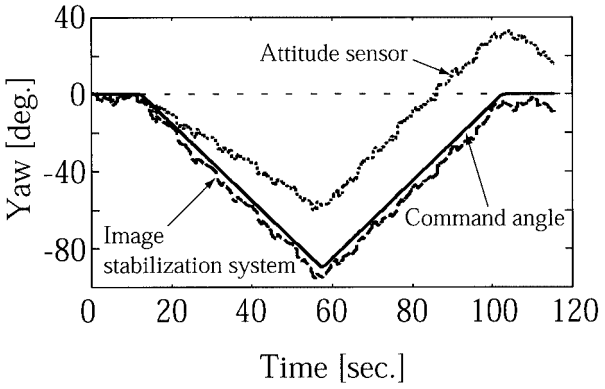

Fig. 16 Change of yaw angle

も正確に測定できる可能性があることが分かった．

さて，画像安定化機構から得られる情報は，実際にはテンプレートを設定した時点からの画面の変位量であるから，ある時刻でのロボットの姿勢は初期姿勢と測定された変位量の和で与えられる．このためロボットが移動し，テンプレートが次々と変更されていくと，次第に姿勢誤差が累積されていく可能性があり，実用上は長時間の使用時には加速度センサなどによる定期的な校正が必要となるものと思われる．この問題については，従来型姿勢センサとの情報融合などとともに次報で検討する予定である．

5. おわりに

本論文では，歩行ロボットの遠隔操縦特有の問題である，支持脚切り替えの不連続性に起因する画像振動に対して，これを除去し安定した画像を得るための高速画像安定化機構を提案した．本機構は画像取得に高速 CCD カメラを用い，画像処理にペンティアム MMX 命令を利用することで，従来のシステムの約 3 倍となる 12 [msec] のスループットで安定化画像が出力可能である．また本機構により視覚情報から姿勢センサとほぼ同等の性能で歩行ロボットの姿勢推定および振動抑制が可能となることを，静歩行を行う 4 足歩行ロボットの制振制御実験により示した．特に重力垂直軸回りの姿勢角は，ドリフト成分の影響が小さいため，構築した画像安定化機構により姿勢センサよりも正確に測定できる可能性がある．

さて構築した画像安定化機構が適切に動作するには，i）画像に映っているシーンの大部分が静止していること，ii）姿勢を推定する場合にはテンプレートとして選択された対象が，並進成分の影響が無視できるほど十分遠くに存在すること，などの制約がある．しかしこれらの制約は従来型姿勢センサやジャイロセンサとの併用，あるいは脚の関節角度から推定されるロボット本体の移動量などにより，ある程度解決可能であり，今後はこれら情報融合の手法や，歩行ロボットの動特性を考慮したオペレータからの指令値と画像振動成分の分離問題などについて検討する予定である．

参考文献

[1] S. Hirose and K. Kato: “Development of Quadruped Walking Robot with the Mission of Mine Detection and Removal,” Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1713–1718, 1998.
[2] Red Whittaker, David Wettergreen and John Bares: “Configuration of a Walking Robot for Volcano Exploration,” pp.487–492, ’93 ICAR, 1993.
[3] Y.S. Yao and R. Chellappa: “Selective Stabilization of Image Acquired by Unmanned Ground Vehicles,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.13, no.5, pp.693–708, 1997.
[4] 日下：“民生用カメラ技術手振れ補正”，テレビジョン学会誌，vol.49, no.2, pp.131–134, 1995.
[5] M. Oshima, T, hayashi, S. Fujioka, T. Inaji, H. Mitani, J. Kajino, K. Ikeda and K. Komoda: “VHS Camcorder with electronic image stabilizer,” IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol.35, no.4, November, 1989.
[6] 米国 Wescam inc. 社，www.wescam.com
[7] 日本航空電子工業（株），www.jae.co.jp
[8] Y.S. Yao, P. Burlina, R. Chellappa and T. Wu: “Electronic image stabilization using multiple visual cues,” Proc. IEEE Int. Conf. of Image Processing, Washingtion DC., Nov., 1995.
[9] M. Irani, B. Rousso and S. Peleg: “Recovery of ego–motion using image stabilization,” Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, June, pp.454–460, 1994.
[10] K. Uomori et al: “Automatic Image Stabilizing System by Full–Digital Signal Processing,” IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol.36, no.3, pp.510–519, 1990.
[11] T. Kinugasa et al: “Electronic Image Stabilizer for Video Camera Use,” IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol.36, no.3, pp.520–525, 1990.
[12] M. Sekine, T. Kondou and H. Hirose: “Motion Vector Detecting System for Video Image Stabilizers,” Proceedings of IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, vol.1994, pp.268–269, 1994.
[13] J.C. Tucker and A.S. Lazaro: “Image stabilization for a camera on a moving platform,” Computers in Engineering 1993, pp.427–431, 1993.
[14] T. Emura and A. Arakawa: “Attitude control of a quadruped robot during two leg supporting,” Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics, pp.711–716, 1991.
[15] 平木，江村，千田，岡田：“反動車モデルによる 4 脚ロボットのトロット歩行”，第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.967–968, 1996.
[16] 上野，岡田，A. Tan：“4 足歩行ロボットの姿勢安定化”，日本機械学会運動と振動の制御シンポジウム講演論文集，pp.132–135, 1995.
[17] 加賀美，岡田，稲葉，井上：“ロボット搭載用実時間視差画像生成システムの構成法”，第 4 回ロボティクスシンポジア講演論文集，pp.177–182, 1999.
[18] C. Tomasi and T. Kanade: “Shape and Motion from Image Streams: A Factorization Method –2. Point Features in 3D Motion,” Technical Report CMU–CS–91–105, Carnegie Mellon Univ., Pittsburg, Penn., Jan. 1991.
[19] 高松，倉爪，広瀬：“視覚支援歩行ロボットの研究—第 1 報：歩行時画像の安定化と姿勢制御—”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’99 講演論文集，1P1–42–059, 1999.
[20] 倉爪，広瀬：“視覚支援歩行ロボットの研究—第 2 報：本体揺動を利用した奥行き知覚—”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’99 講演論文集，1P1–42–061, 1999.
[21] 倉爪，広瀬：“視覚支援歩行ロボットの研究—第 3 報：高速画像安定化機構の開発—”，第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.135–136, 1999.
[22] R. Kurazume and S. Hirose: “Development of image stabilization system for a remote operation of walking robots,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1856–1861, 2000.
[23] 倉爪，葉石，広瀬：“視覚支援歩行ロボットの研究（第 4 報：高速画像安定化機構を用いた遠隔操縦性能の向上）”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’00 講演論文集，2P1–46–76, 2000.

[24] 倉爪，広瀬：“視覚支援歩行ロボットの研究（第5報：本体揺動と基本行列による単眼歩行ロボットの奥行き知覚)”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’00 講演論文集，2P2–46–62, 2000.

倉爪 亮（Ryo Kurazume）

1967年2月4日生．1991年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了．同年（株）富士通研究所入社，1995年同大学機械宇宙学科助手，現在に至る．ニューロコンピューティング，群ロボット，コンピュータビジョンの研究に従事．1993年度日本ロボット学会論文賞受賞．博士（工学）

（日本ロボット学会正会員）

広瀬茂男（Shigeo Hirose）

1947年12月6日生．1976年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了．同年，同大学機械物理工学科助手，1979年同大学助教授，1992年同大学教授，現在に至る．ロボットの機構，センサ，制御の研究に従事．工学博士．　（日本ロボット学会正会員）