学術・技術論文

歩行パターン・レギュレータによる高速歩行ロボットの安定化制御

吉野 龍太郎*

Stabilizing Control of High–Speed Walking Robot by Walking Pattern Regulator

Ryutaro Yoshino*

In general, when the robot is made to walk, it is necessary to make the walking pattern which is called gait. In making this walking pattern, a known walking surface is assumed. And, the walking pattern is made by using the inverted pendulum model or the ZMP (Zero moment Point) criterion, etc. to walk on the surface. However, because unknown disturbance like unevenness etc. of surface exists actually even if the joint of robot is controlled to track to the walking pattern precisely, walking becomes unstable. It is described to be able to achieve a steady walking by adding the controller which regulates the walking pattern disturbed by an unknown uneven surface etc. to the joint servo system which tracks to the walking pattern in this paper. Moreover, it is shown to be able to derive the controller by the optimal regulator theory. Finally, this stabilizing control was installed in the biped walking robot and the result of the walking experiment of 3 kilometers an hour is described.

Key Words: Walking Pattern, Servo System, Stabilizing Control, Optimal Regulator, Biped Walking Robot

1. はじめに

一般に，脚式移動ロボットを歩行させる場合，まず第一にいわゆる歩容と呼ばれる歩行パターンを作成する．その際に歩行路面を既知として，倒立振子モデルや ZMP 規範等を用い転倒しないような歩行パターンを作成する．

2 足歩行ロボットの場合，足平があり足首トルクの発生できるロボットであれば作成された歩行パターンに追従制御させることにより既知路面上を足平面積による安定余裕内で歩行が可能となる [1] [2]．一方，足首トルクの発生できないロボットの場合，歩行パターンへの追従制御に加え遊脚の着地位置を制御するなどの安定化制御が必要となる [3] [4]．

しかし高速歩行になると前者のロボットの場合，作成された歩行パターンに正確に追従制御しても遊脚着地時の強い衝撃や路面上の凹凸のため足平面積による安定余裕がなくなり簡単に転倒してしまう．また，安定化制御則設計のため本来，非線型であるロボットの運動モデルを線形近似して制御設計（最適レギュレータによる設計 [14]）を行うことが多い．そのため非線型性の影響が大きく現れる高速歩行では線形近似が困難となる．

一方，近年計算機の高速化により歩行ロボットにみられるような衝突等の非線型な物理現象を短時間にシミュレーションすることが可能となってきた [5]～[7]．これにより既知路面での歩行が容易にシミュレーションでき安定性の高い歩行パターンを高精度に作成できるようになった [8] [9]．しかし，実路面上で歩行を実現するには路面上の凹凸のような未知の外乱に対応する安定化制御が必要である [10] [11]．

ところで有名な除脳ネコの実験にみられるように，歩行パターンは安定化制御とは別に CPG（Central Pattern Generator）により自動的に生成されるという報告がある [12]．筆者はネコの歩行は，歩行パターンに追従する制御系になんらかの安定化制御が加えられることにより実現していると考えた．

また人間の生活空間において平坦と思われる路面でも，視覚により検知不能な未知の凹凸があり前もって歩容を変えることは不可能であると考える．

本論文ではこのような観点から，二足歩行ロボットにおいてまず既知路面上で安定な歩行パターンを ZMP 規範に基づき作成し，その歩行パターンに正確に追従する関節角サーボ系を構成する．後にそのサーボ系に未知外乱が作用しても常にその歩行パターンを維持するレギュレータ Walking Pattern Regulator（WPR）を構成する．これにより安定化制御を実現し未知の凹凸のある路面でも安定な歩行が実現できることについて述べる．さらにその安定化制御系を最適レギュレータ理論 [13] により設計したことについて述べる．

原稿受付 1999 年 9 月 16 日
*本田技術研究所
*HONDA R&D Co., LTD.

2. 歩行ロボットと制御装置

2.1 ロボットの構造

本ロボットの関節構造と各センサの取り付け位置等を **Fig. 1** に示す．片足6関節，全12関節の構造になっている．足首2軸と腰3軸は回転軸が一点で交差する．これにより運動学計算が簡略化できる．足首と腰の y 軸の駆動は，それぞれ脛と腿に設置された DC モータから伝達ベルトとプーリで関節部に内蔵されたハーモニック・ギヤに伝達して行っている．他の関節は関節部に内蔵された DC モータとハーモニック・ギヤで駆動されている．上体には x 軸，y 軸まわりの角速度と角度が検出できる傾斜センサ（振動式ジャイロで角速度を検出し，角度はそれを積分することにより検出する．ただし振り子で積分誤差を補正する）を取り付けてある．

両足首にはゴム等を介さずに直接6軸力センサを足平に固定してある．これにより遊脚の足関節をコンプライアンス制御し踵の着地衝撃を吸収する．さらに踵には着地時の衝撃を瞬時に吸収するための市販のリニアタイプのエアダンパを取り付けてある．次に足裏全面が路面に密着したときには，6軸力センサからの入力を中断しコンプライアンス制御を停止する．また足裏には滑り防止用にゴムシートを貼り付けてある．各関節角はモータに組み込まれているロータリ・エンコーダにより検出する．

DC モータを駆動するアンプは上体に内蔵してある．

全体の重心（体重 82 [kgf]）の位置は直立時に路面から 0.9 [m] の高さにある．よって腰関節よりわずかに上にあることになる．

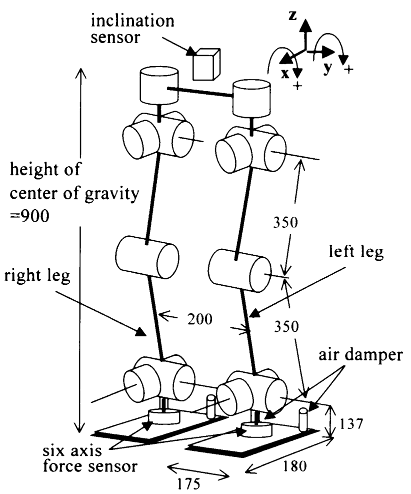


Fig. 1 Configuration of robot

2.2 制御装置

Fig. 2 に本ロボットの制御装置の構成を示す．

本システムは VME システムにより構成されている．関節角はカウンタから入力し，傾斜角，角速度と6軸力センサは A/D 変換器から入力する．SubCPU により計算された速度指令値は D/A 変換器により速度制御型のサーボ・アンプに出力される．サーボ・アンプにはエンコーダパルス列を F/V 変換器により速度に変換しフィードバックしている．二つの CPU 間の通信は共有 RAM で行う．制御周期は歩行パターンの更新と同期させ 5 [ms] とした．

3. 歩 行 制 御

作成された歩行パターンへ，各関節角を追従制御させる歩行パターン追従制御と歩行安定化のために加えられる安定化制御 WPR について述べる．

3.1 歩行パターン追従制御

歩行パターン追従制御のブロック図を **Fig. 3** に示す．ロボットの各関節の制御を関節角サーボで構成する．マイナループの速度サーボ系は比例・微分制御とした．作成された歩行パターンから各関節の角度，角速度を算出し関節角サーボにおのおの指令値として入力する．この結果，歩行ロボットの関節角は作成された歩行パターンに忠実に追従する．

次にこのサーボ系を含んだ歩行ロボットの運動方程式を導出する．ここで支持脚足平は路面に対し動かない，すなわち滑ったり跳ねたりしないこととする．この仮定は歩行パターンを作成する際の条件でもあり，実際には足裏に滑り防止用のゴム等を貼り対応する．またピッチ面内の運動とロール面内の運動を

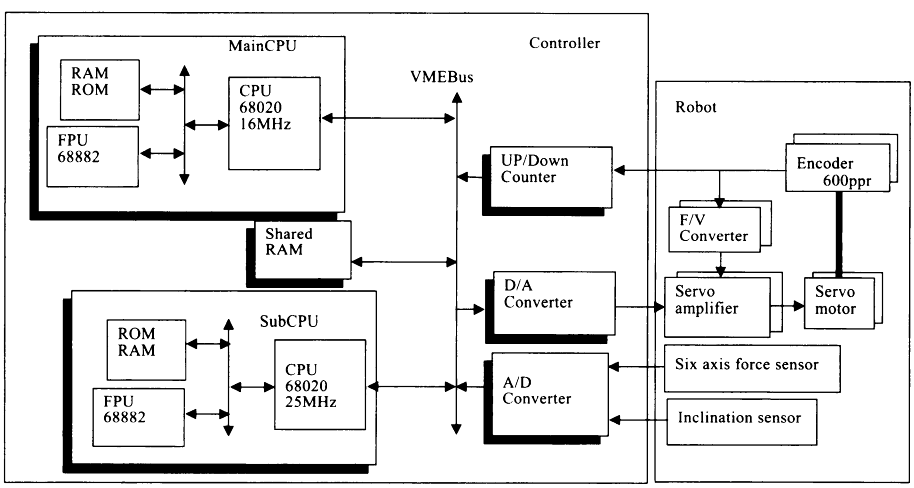


Fig. 2 Block diagram of control systems

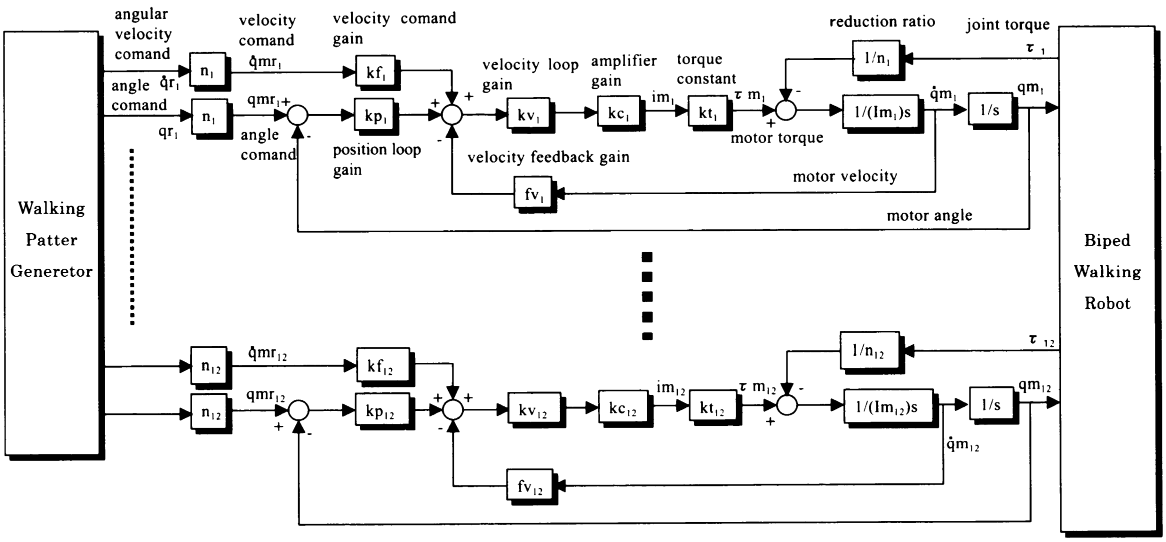


Fig. 3 Block diagram of servo systems

分離して考え両者の干渉は微少外乱として扱う．

以上の仮定から歩行ロボットのピッチ，ロール面内の各運動方程式は一般の多関節マニピュレータと同様に式（1）となる．

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta})\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta})\dot{\boldsymbol{\Theta}}^2+\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{F}=\boldsymbol{M}\boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

ただし

$\boldsymbol{J},\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y},\boldsymbol{Z}$：$\boldsymbol{\Theta}$ を変数とする正方行列
$\boldsymbol{\Theta}$：リンクの絶対角のベクトル
$\boldsymbol{F}$：遊脚の先端にかかる外力ベクトル
$\boldsymbol{\tau}$：関節トルクベクトル
$\boldsymbol{M}$：定数行列

ここで j 関節のモータ発生トルク τ_jは 式（2）と表せる．

$$\tau_j = n_j\cdot\tau m_j - n_j\cdot Im_j\cdot\ddot{q}m_j \tag{2}$$

ただし

τ_j：j 関節のトルク
n_j：j 関節の減速比
τm_j：j 関節のモータトルク
Im_j：モータと減速器のイナーシャの和
$\ddot{q}m_j$：j 関節のモータの角加速度

一方，モータ発生トルクは式（3）で表せる．

$$\tau m_j = kqr_j\cdot qmr_j + k\dot{q}r_j\cdot\dot{q}mr_j - kq_j\cdot qm_j - k\dot{q}_j\cdot\dot{q}m_j \tag{3}$$

ただし

qmr_j：j 関節のモータ角度指令値
$\dot{q}mr_j$：j 関節のモータ角速度指令値
qm_j：j 関節のモータ角度
$\dot{q}m_j$：j 関節のモータ角速度
$kqr_j = kq_j = kt_j\cdot kc_j\cdot kv_j\cdot kp_j$
$k\dot{q}r_j = kt_j\cdot kc_j\cdot kv_j\cdot kf_j$
$k\dot{q}_j = kt_j\cdot kc_j\cdot kv_j\cdot fv_j$
kt_j：j 関節のモータトルク定数
kc_j：j 関節のサーボアンプゲイン
kv_j：j 関節の速度ループゲイン
kp_j：j 関節の位置ループゲイン
kf_j：j 関節の速度指令ゲイン
fv_j：j 関節の速度フィードバックゲイン

よって式（2）は式（4）と表せる．

$$\begin{aligned}\tau_j &= n_j\cdot kqr_j\cdot qmr_j + n_j\cdot k\dot{q}r_j\cdot\dot{q}mr_j\\ &\quad - n_j\cdot kq_j\cdot qm_j - n_j\cdot k\dot{q}_j\cdot\dot{q}m_j\\ &\quad - n_j\cdot Imj\cdot\ddot{q}m_j\end{aligned} \tag{4}$$

ここで，モータ角とモータ角度指令値は式（1）のリンクの絶対角 θ_j を用いて式（5–1），（5–2）で表せる．

$$qmr_j = n_j\cdot qr_j = n_j(\theta r_j - \theta r_{j-1}) \tag{5–1}$$
$$qm_j = n_j\cdot q_j = n_j(\theta_j - \theta_{j-1}) \tag{5–2}$$

ただし

qr_0：支持脚足首関節角指令値
qr_j：j 関節角指令値
q_0：支持脚足首関節角
q_j：j 関節角
θr_0：支持脚足首関節絶対角指令値
θr_j：j リンクの絶対角指令値
θ_0：支持脚足平絶対角
θ_j：j リンクの絶対角

ここで足平は路面から動かないと仮定すると，次式が成立する．

$$\theta_0 = \dot{\theta}_0 = \ddot{\theta}_0 = 0$$

よって式（5）を式（4）に代入すると，関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ は式（6）で表される．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r} + \boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\\ &\quad - \boldsymbol{Fp}\cdot\boldsymbol{\Theta} - \boldsymbol{Fv}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}} - \boldsymbol{Im}\cdot\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\end{aligned} \tag{6}$$

ここで，

$$\boldsymbol{\Theta r} = (\theta r_1, \ldots, \theta r_n)^t$$

$$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \ldots, \tau_n)^t$$

$\boldsymbol{Kqr}$：角度指令値のゲインマトリックス
$\boldsymbol{K\dot{q}r}$：角速度指令値のゲインマトリックス
$\boldsymbol{Fp}$：角度フィードバックのゲインマトリックス
$\boldsymbol{Fv}$：角速度フィードバックのゲインマトリックス
$\boldsymbol{Im}$：モータと減速器ノイナーシャのマトリックス

式（6）を式（1）に代入し整理すると式（7）となる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}^2+\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta})\cdot\boldsymbol{F}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\\ =\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\end{aligned} \quad (7)$$

式（7）が歩行パターン $\boldsymbol{\Theta r}, \dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}$ に追従するサーボ系を含んだ歩行ロボットの運動方程式である．

3.2 安定化制御

運動方程式（7）で表される歩行ロボットに外乱が存在しなければ，リンクの絶対角 $\boldsymbol{\Theta}$ は歩行パターンに正確に追従するので既知路面上であれば安定な歩行を実現できる．しかし実際には，路面上の凹凸等の外乱により作成された安定な歩行パターンからずれてしまい転倒してしまう．よって安定化制御が必要となる．

ここで式（7）の歩行ロボットに外乱が加わり，歩行パターンからリンクの絶対角 $\boldsymbol{\Theta}$ が $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ ずれた場合の運動方程式を考える．このときの絶対角 $\boldsymbol{\Theta}$ は式（8）で表せる．

$$\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Theta r} + \Delta\boldsymbol{\Theta} \quad (8)$$

さらにこのずれを補正するために，新たな操作量 $\boldsymbol{U}$ を角速度指令の加算部に加えると式（7）に式（8）を代入し式（9）となる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})(\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\ddot{\boldsymbol{\Theta}})\\ +\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})\cdot(\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}})^2\\ +\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})\cdot\boldsymbol{F}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot(\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}})\\ =\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Ku}\cdot\boldsymbol{U}\end{aligned} \quad (9)$$

ただし

$\boldsymbol{Ku}$：操作量のゲインマトリックス

ここで $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ が十分小さいとすると式（9）は式（10）と表せる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+(\partial\boldsymbol{J}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})(\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\ddot{\boldsymbol{\Theta}})\\ +\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r}+(\partial\boldsymbol{X}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta})\cdot(\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}})^2\\ +\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta r})+(\partial\boldsymbol{Z}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\\ +(\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta r})+(\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta})\cdot\boldsymbol{F}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot(\boldsymbol{\Theta r}+\Delta\boldsymbol{\Theta})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot(\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}})\\ =\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Ku}\cdot\boldsymbol{U}\end{aligned} \quad (10)$$

ただし $(\partial*/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}$ は，行列 $*$ の $\boldsymbol{\Theta r}$ における $\boldsymbol{\Theta}$ に関する偏微分係数を表す．

$\boldsymbol{\Delta\Theta}$ の2次以上の項を無視すると式（11）となる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}^2+\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta r})\\ +\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\boldsymbol{F}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\\ +(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\Delta\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+(\partial\boldsymbol{J}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\cdot\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\\ +2\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\cdot\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}}+(\partial\boldsymbol{X}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}^2\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\\ +(\partial\boldsymbol{Z}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}+(\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\cdot\boldsymbol{F}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}}\\ =\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Ku}\cdot\boldsymbol{U}\end{aligned} \quad (11)$$

ここで本サーボ系により関節角は指令値に正確に追従でき，歩行が安定であるとすると以下の式が成り立つ．

$$\boldsymbol{\Theta}\cong\boldsymbol{\Theta r}, \dot{\boldsymbol{\Theta}}\cong\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}, \ddot{\boldsymbol{\Theta}}\cong\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}$$

ゆえに式（7）と上の等式より式（12）が成り立つとする．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}^2+\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\boldsymbol{F}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\\ =\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Kqr}\cdot\boldsymbol{\Theta r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{K\dot{q}r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\end{aligned} \quad (12)$$

よって式（11）に式（12）を代入し，ずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ に関する線形な方程式，式（13）が導出できる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\Delta\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\\ +2\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\cdot\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}}\\ +(\partial\boldsymbol{J}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}+(\partial\boldsymbol{X}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}^2\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\\ +(\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\cdot\boldsymbol{F}+(\partial\boldsymbol{Z}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\\ +\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}=\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Ku}\cdot\boldsymbol{U}\end{aligned} \quad (13)$$

ここでサーボ系の偏差を十分小さくするため $\boldsymbol{Fp}, \boldsymbol{Fv}$ は十分大きくとる．よって本ロボットの場合，式（13）の行列の各行において関係式，式（14），（15）が成り立つ（付録A参照）．

$$\sum_j |(2\boldsymbol{X}(\boldsymbol{\Theta r})\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r})_{ij}| \le \sum_j |(\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv})_{ij}| \quad (14)$$

$$\begin{aligned}\sum_j |((\partial\boldsymbol{J}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\ddot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}+(\partial\boldsymbol{X}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\dot{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{r}^2)_{ij}|\\ \le \sum_j |((\partial\boldsymbol{Z}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp})_{ij}|\end{aligned} \quad (15)$$

ただし $(*)_{ij}$ は i 行 j 列の要素を表す．

ここで式（14），（15）の左辺は十分小さいとして無視すると式（13）は式（16）となる．

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\Theta r})+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Im})\Delta\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}\cdot\Delta\dot{\boldsymbol{\Theta}}\\ +(\partial\boldsymbol{Z}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\\ +(\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{r}\cdot\Delta\boldsymbol{\Theta}\cdot\boldsymbol{F}=\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Ku}\cdot\boldsymbol{U}\end{aligned} \quad (16)$$

外力 $\boldsymbol{F}$ が存在し検出可能であれば，新たに操作量 $\boldsymbol{U}$ を式（17）のように計算することにより式（18）となる．

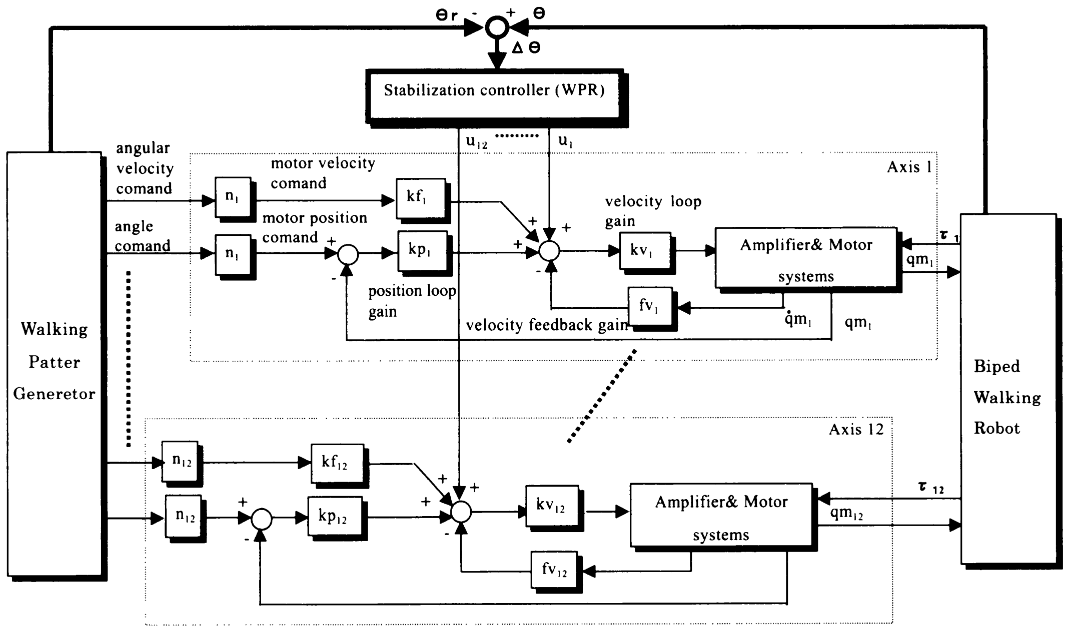


Fig. 4 Block diagram of robot control systems

$$U = u + (M \cdot Ku)^{-1} \cdot (\partial Y/\partial \Theta) r \cdot \Delta\Theta \cdot F \qquad (17)$$

$$(J(\Theta r) + M \cdot Im)\Delta\ddot{\Theta} + M \cdot Fv \cdot \Delta\dot{\Theta} + (\partial Z/\partial \Theta) r \cdot \Delta\Theta + M \cdot Fp \cdot \Delta\Theta = M \cdot Ku \cdot u \qquad (18)$$

式（18）は新たな操作量 $\boldsymbol{u}$ に対する歩行パターンからのずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ に関する線形な運動方程式を表している．このことはロボット単体の運動方程式の線形化より，サーボ系を含めたロボットの運動方程式の線形化の方が高速な運動まで線形化が可能であることを示している．

ここで操作量 $\boldsymbol{u}$ により，ずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ を常に "0" にレギュレートすることができれば歩行を安定化できる．なぜなら歩行ロボットに外乱が加わっても，作成された安定な歩行パターンからずれないからである．このレギュレータを歩行パターン・レギュレータ WPR（Walking Pattern Regulator）と呼ぶことにする．

次にこのレギュレータ WPR の設計は式（18）が線形であることより以下のように行う．

式（18）を状態方程式，式（19）と式（20）で表せる．

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \qquad (19)$$

$$y = C \cdot x \qquad (20)$$

ただし

$$x = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \ldots, \Delta\theta_n, \Delta\dot{\theta}_1, \Delta\dot{\theta}_2, \ldots, \Delta\dot{\theta}_n)^t$$

$$y = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \ldots, \Delta\theta_n)^t$$

$$u = (u_1, u_2, \ldots, u_n)^t$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -(J(\Theta r) + M \cdot Im)^{-1}\left(\left(\frac{\partial Z}{\partial \Theta}\right)_r + M \cdot Fp\right) & -(J(\Theta r) + M \cdot Im)^{-1} M \cdot Fv \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ (J(\Theta r) + M \cdot Im)^{-1} M \cdot Ku \end{pmatrix} \quad C = (I \quad 0)$$

である．

最適レギュレータ理論を用い式（21）の評価関数 $\boldsymbol{J}$ を最小にする $\boldsymbol{u}$ を求めると式（22）となる．

$$J = \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt \qquad (21)$$

$\boldsymbol{Q}, \boldsymbol{R}$: 正定対称行列

$$u = -Kx \cdot x \qquad (22)$$

評価関数 $\boldsymbol{J}$ を最小にするということは，すなわち歩行パターンからのズレ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ を最小にすることになる．

安定化制御も含めた歩行制御システムを **Fig. 4** に示す．

次に歩行パターンからのずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ の検出方法について述べる．本ロボットには上体にピッチとロールの傾斜角，傾斜角速度を検出する傾斜センサが取り付けてある．これとモータの角度と角速度から減速比を用い関節角度，角速度を算出する．ピッチ面内の運動の場合以下のように検出できる．

ここで

θ_0：支持脚足平リンク絶対角
θ_1：支持脚脛リンク絶対角
θ_2：支持脚腿リンク絶対角
θ_3：上体リンク絶対角
θ_4：遊脚腿リンク絶対角
θ_5：遊脚脛リンク絶対角
θ_6：遊脚足平リンク絶対角

とすると各リンクの絶対角は傾斜角 φ と関節角で式（23–1）〜

(23–6) と表せる．

$$\theta_3 = \varphi \quad (23\text{–}1)$$
$$\theta_2 = \theta_3 - q_3 = \varphi - q_3 \quad (23\text{–}2)$$
$$\theta_1 = \theta_2 - q_2 = \varphi - q_2 - q_3 \quad (23\text{–}3)$$
$$\theta_4 = \theta_3 + q_4 = \varphi + q_4 \quad (23\text{–}4)$$
$$\theta_5 = \theta_4 + q_5 = \varphi + q_4 + q_5 \quad (23\text{–}5)$$
$$\theta_6 = \theta_5 + q_6 = \varphi + q_4 + q_5 + q_6 \quad (23\text{–}6)$$

ここで作成された歩行パターンにおいて，ボディは常に垂直に維持することとした．よってずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ は式 (24) と表せる．

$$\begin{aligned}\Delta\theta_1 &= \varphi - q_2 - q_3 - (0 - qr_2 - qr_3)\\ &= \varphi - \Delta q_2 - \Delta q_3 \quad (24\text{–}1)\end{aligned}$$
$$\Delta\theta_2 = \varphi - q_3 - (0 - qr_3) = \varphi - \Delta q_3 \quad (24\text{–}2)$$
$$\Delta\theta_3 = \varphi - 0 = \varphi \quad (24\text{–}3)$$
$$\Delta\theta_4 = \varphi + q_4 - (0 + qr_4) = \varphi + \Delta q_4 \quad (24\text{–}4)$$
$$\begin{aligned}\Delta\theta_5 &= \varphi + q_4 + q_5 - (0 + qr_4 + qr_5)\\ &= \varphi + \Delta q_4 + \Delta q_5 \quad (24\text{–}5)\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}\Delta\theta_6 &= \varphi + q_4 + q_5 + q_6 - (0 + qr_4 + qr_5 + qr_6)\\ &= \varphi + \Delta q_4 + \Delta q_5 + \Delta q_6 \quad (24\text{–}6)\end{aligned}$$

ただし

$$\Delta q_j = q_j - qr_j \quad j = 2\ldots 6$$

よって歩行パターンからのずれ量 $\boldsymbol{\Delta\Theta}$ は，傾斜センサと各関節角の偏差から算出でき状態変数 $\boldsymbol{x}$ は式 (25) で表せる．

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{q} \quad (25)$$

ただし

$$\boldsymbol{x} = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \ldots, \Delta\theta_6, \Delta\dot{\theta}_1, \Delta\dot{\theta}_2, \ldots, \Delta\dot{\theta}_6)^t$$
$$\boldsymbol{q} = (\varphi, \Delta q_2, \ldots, \Delta q_6, \dot{\varphi}, \Delta\dot{q}_6, \dot{\varphi}, \Delta\dot{q}_2, \ldots, \Delta\dot{q}_6)^t$$
$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

よって安定化のための操作量 $\boldsymbol{u}$ を算出する式 (22) の状態フィードバックゲイン $\boldsymbol{Kx}$ を最適レギュレータ理論より求めた後，実ロボットに実装する場合，傾斜センサ出力と関節角の偏差を用いるため式 (26) の $\boldsymbol{Kq}$ を用いる．以下このフィードックをリンクフィードバック (LFB) と呼ぶ．

$$\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{Kx}\cdot\boldsymbol{x} = -\boldsymbol{Kx}\cdot\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{Kq}\cdot\boldsymbol{q} \quad (26)$$

ところで変換行列 $\boldsymbol{E}$ の構成要素をみると関節角の偏差 $\Delta q_j, \Delta\dot{q}_j$ の係数に対応する要素はほとんど “0” である．また関節角サーボにより関節角の偏差は傾斜角より十分小さいと考えられる．よって状態変数 $\boldsymbol{x}$ の算出には用いないことにする．よって操作量 $\boldsymbol{u}$ は傾斜角と傾斜角速度のゲインだけを用い式 (27) から算出することもできる．

$$\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{K}\varphi\cdot(\varphi, \dot{\varphi})^t \quad (27)$$

本ロボットの場合，式 (27) を使用した場合の安定化制御系の固有値を求めると漸近安定となり式 (26) の固有値と大きな差は生じなかった（付録 B 参照）．次章で述べる実験結果からも式 (27) で安定化が実現できた．以下このフィードックを傾斜フィードバック (IFB) と呼ぶ．

以上，ピッチ面内の運動について述べたが，ロール面内の運動もまったく同様である．

4. 実 験 結 果

3 章で述べた安定化制御はピッチ面内の運動 (frontal plane)，とロール面内の運動 (sagittal plane) に分離して行った．ただしピッチ面内の運動において計算機の処理時間を考慮し，特に安定性に寄与すると思われる支持脚足首関節，膝関節と両腰関節のみに安定化制御を加え，4 関節モデルとして扱った．

4.1 安定化制御のステップ応答

本制御系設計に用いた姿勢 $\boldsymbol{\Theta r}$ は，片足支持期の遊脚中央姿勢とした．そのときの式 (19) の $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ の数値を付録Bに示す．

本制御系の安定性を示すため，ステップ外乱を加えた場合の応答実験について述べる．ステップ外乱として片足支持状態で支持脚足首関節角指令値に -3 [deg]，ステップ入力し（静的には重心位置は常に足平面内に存在する）各リンク角の応答性を計測した．

このステップ入力の結果，足関節より上部は慣性によりその姿勢を維持しようとするため支持脚足平が負の方向に回転し片方のエッジが床面からいったん離れて，次に重力により正の方向にロボットが傾斜していく応答が見られた．

Fig. 5, **Fig. 8** に安定化制御のない場合の実験結果を示す．勢い余って重心が足平面内を外れ転倒してしまった（図中の hold は応答の減衰を見るため転倒を人為的に支え安定させた期間）．

Fig. 6, **Fig. 9** に LFB の場合の実験結果を示す．

Fig. 7, **Fig. 10** に IFB の場合の実験結果を示す．

ただし絶対角は，Fig. 1 の座標軸を正の方向から見て時計まわりを正とする．よってピッチ面内では前方に傾斜しロール面内では左足歩方向に傾斜していることになる．

両フィードバック方式とも状態フィードバックのために支持脚足平以外，オフセットが残っているが重心が足平面内に収まり安定している．また前章で述べたように両方式の固有値にあまり差がないことから応答にも大きな差は見られなかった．

ロール面内の運動の方が振動的で減衰が悪いが，これは最終姿勢の重心位置が足平のエッジに近かったため支持脚足平が安

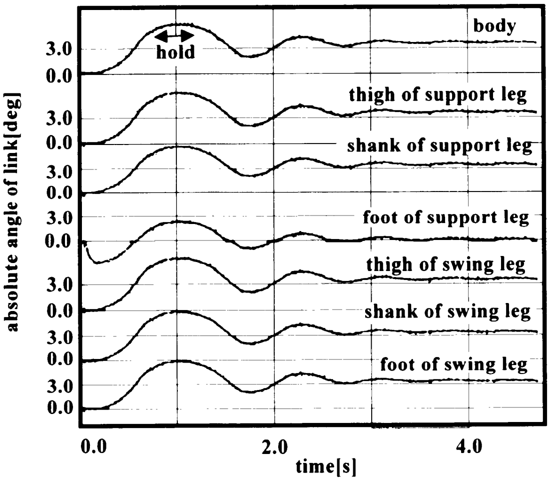


Fig. 5 Step response without stabilizing control in sagittal plane

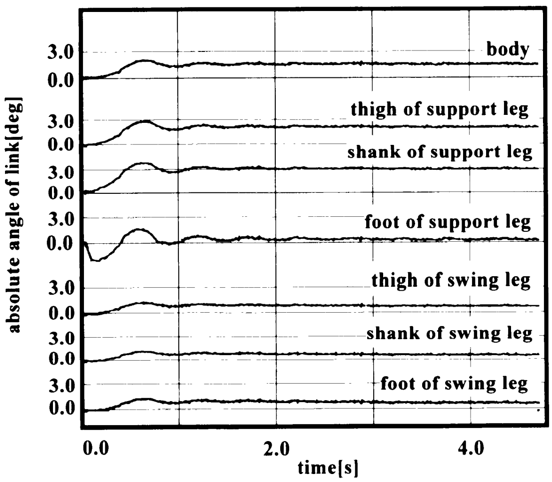


Fig. 6 Step response with stabilizing control by LFB in sagittal plane

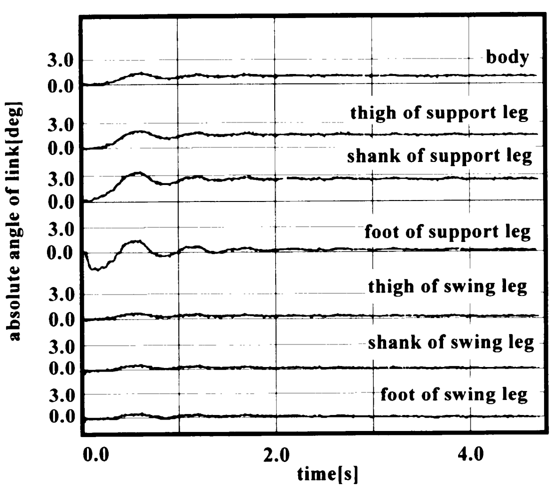


Fig. 7 Step response with stabilizing control by IFB in sagittal plane

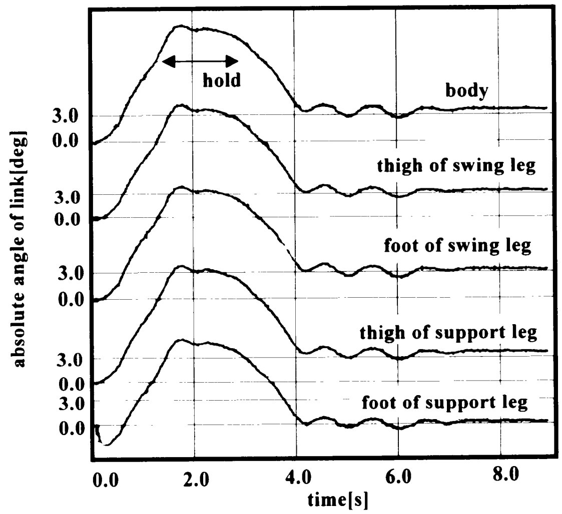


Fig. 8 Step response without stabilizing control in frontal plane

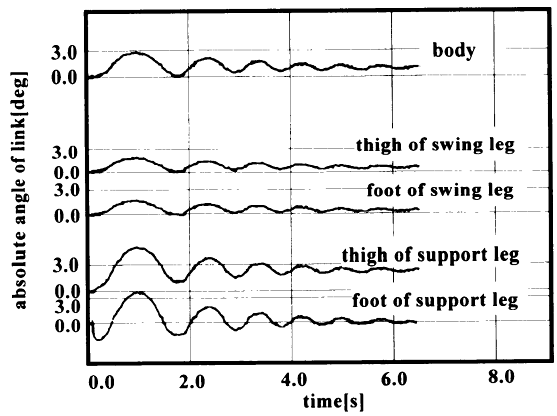


Fig. 9 Step response with stabilizing control by LFB in frontal plane

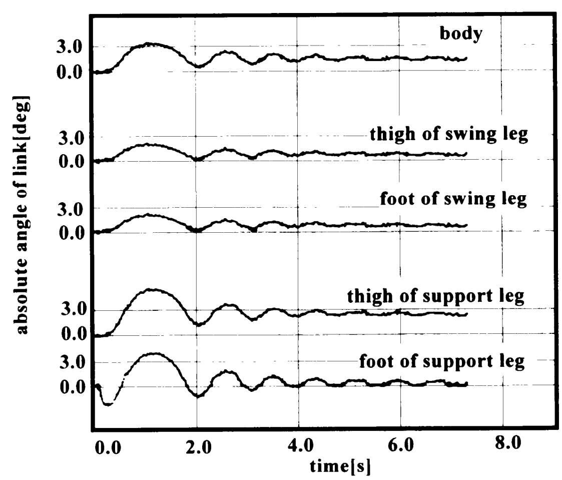


Fig. 10 Step response with stabilizing control by IFB in frontal plane

定しないためと考える．また本安定化制御は，足平は路面に固定されているという仮定が破れても，安定性を保持できるロバスト性があると考える．

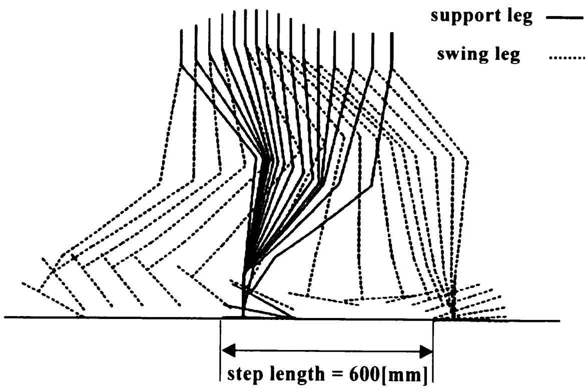


Fig. 11 Walking pattern of sagittal plane

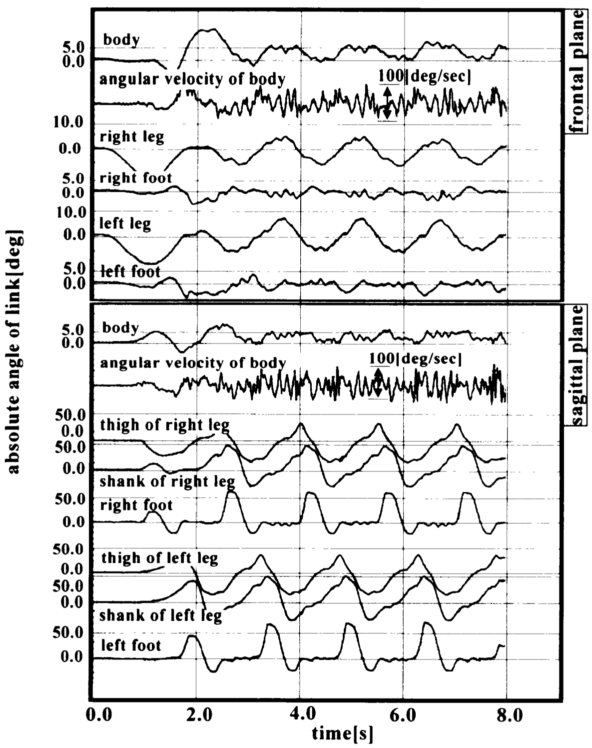


Fig. 12 Walking on even surface by IFB

4.2 歩行実験

本研究で用いた 3 [km/h] の定常時の歩行パターンを，0.05 [sec] 間隔で表示したスティック図を **Fig. 11** に示す．片足支持期の ZMP 軌道は支持脚踵の内側 2 [cm] からはじまり，0.65 [sec] 後に爪先の内側 2 [cm] まで等速直線で移動する．次の 0.1 [sec] の両脚支持期の間に ZMP を前足に移動させる．以上を繰り返す．

Fig. 12，**Fig. 13** に平坦路での IFB 方式，LFB 方式それぞれの歩行実験結果を示す．最初の 2 歩で加速し 3 歩目から定常歩行になる．歩行パターンの作成に用いた平坦路であっても安定化制御がないとエアダンパ等による衝撃吸収のみでは外乱で転倒してしまう．しかし本安定化制御 WPR を加えることにより歩行を安定化することができた．

次に凹凸路面での実験結果について述べる．本研究では

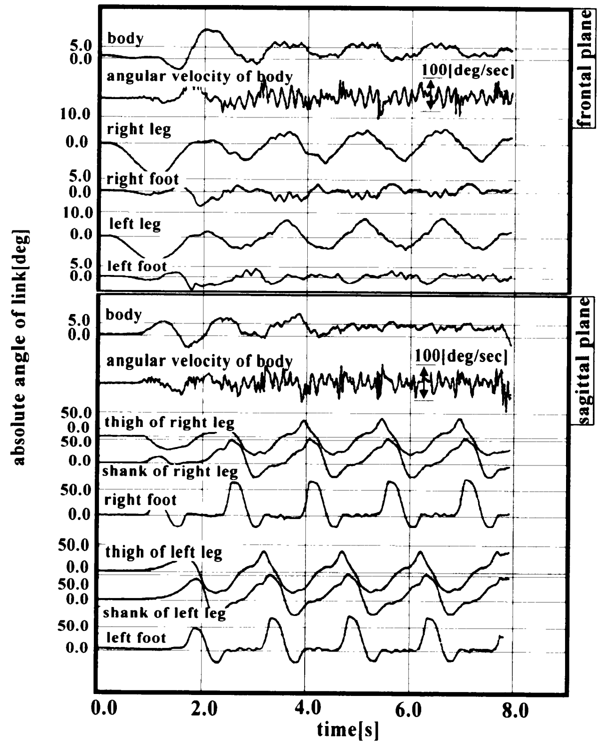


Fig. 13 Walking on even surface by LFB

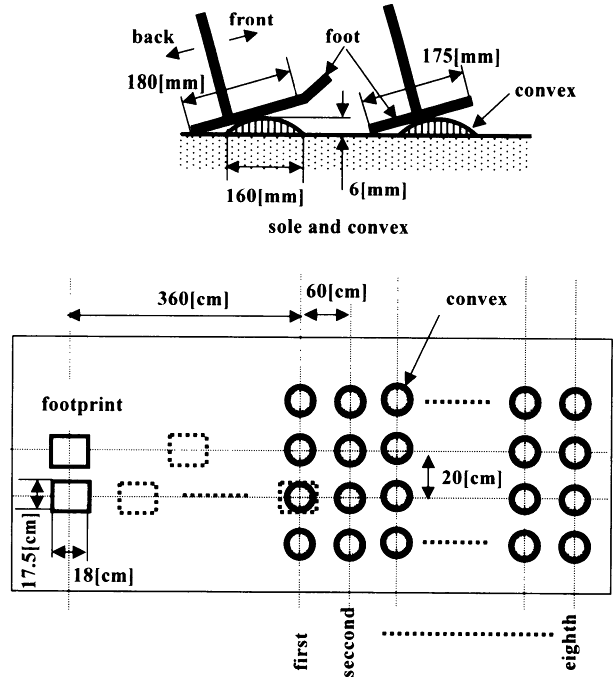


Fig. 14 Experimental uneven surface

Fig. 14 のような人工的な凹凸路面を製作した．人間の生活空間で平坦と思われている路面でも，視覚では検知不能な凹凸が存在する．そこで実験室の床面のうねりをレーザで計測し，その結果から最大の凸部を半径 536 [mm] の球体を高さ 6 [mm] の円弧でカットした直径 160 [mm] の凸円盤でモデル化した．この円盤を安定性が最も損なわれるように必ず片方の足が凸部を

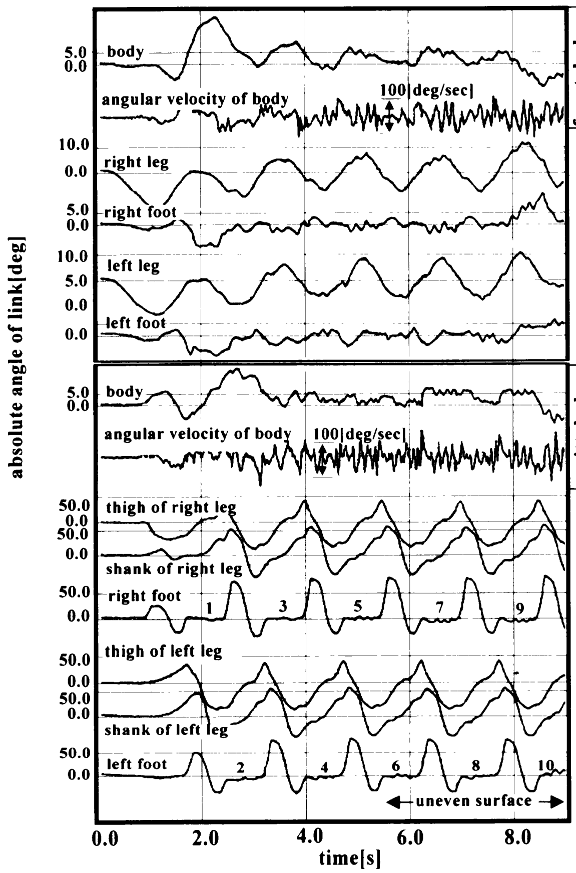


Fig. 15 Walking on uneven surface by IFB

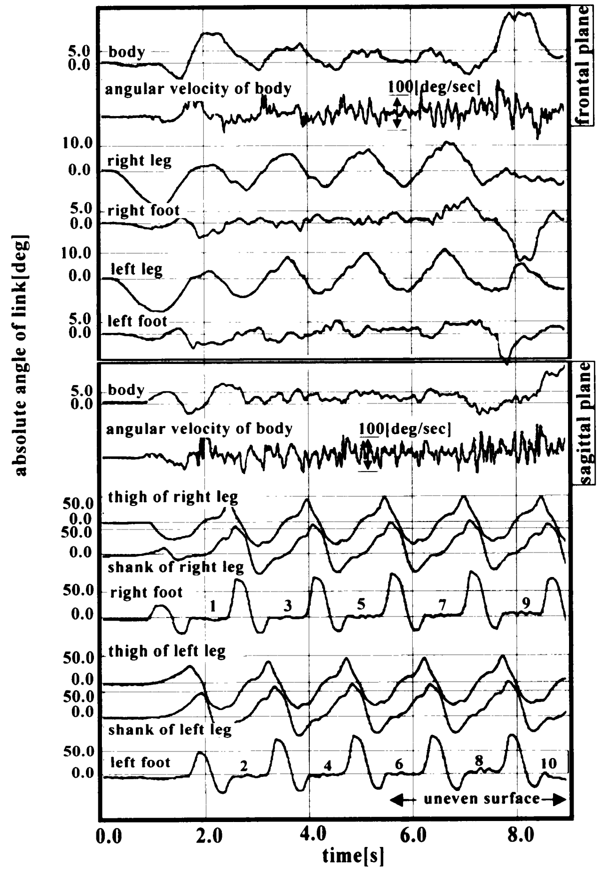


Fig. 16 Walking on uneven surface by LFB

踏む歩幅と歩隔に合わせメッシュ状に配置した．

Fig. 15, **Fig. 16** に凹凸路面での IFB 方式，LFB 方式それぞれの歩行実験結果を示す．この実験では，スタートから 6 歩目の左足が最初に凸部を踏み 10 歩目の左足支持期のときに転倒した．

よって 4 個所の凸部を踏破できたことになる．5 列目以降の凸部を撤去し平坦路に戻すと安定歩行を持続できた．数回の試行の結果 3，4 個程度の凸部は踏破できた．本安定化制御が十分有効であると考える．

5. おわりに

まず歩行パターンに正確に追従する関節角サーボ系を構成し，後に最適レギュレータによる安定化制御系 WPR を加えることにより歩行の安定化を実現した．また簡便に傾斜をフィードバックするのみでも安定化できることを示した．未知外乱としてモデル化した高さ 6 [mm]，直径 160 [mm] の凸部を 3 または 4 個本安定化制御により踏破した．

本安定化制御は反射的な安定化の一手法である．さらに歩行の安定性を高めるためには今回短時間で比較的安定であると考え安定化を加えなかった両脚支持期にも安定化を加え，路面の凹凸や傾斜角に応じて歩行速度を変えるなどの知的な歩行戦略が必要と考える．本安定化手法は 2 足歩行ロボットのみならず多脚式歩行ロボットにも展開可能であると考える．

謝 辞 本研究の機会をいただいた（株）本田技術研究所に感謝いたします．歩行パターン作成，およびメカニズム製作をしていただいた研究室の皆様に感謝いたします．特にプログラム開発，実験の協力者である高橋英男氏に感謝します．

参 考 文 献

[1] 高西，石田，山崎，加藤：“2 足歩行ロボット WL-10RD による動歩行の実現”，日本ロボット学会誌，vol.3, no.4, pp.325–336, 1985.
[2] 舟橋，小川，本田，岩附：“二足歩行機械の脚機構の総合（第 2 報，足部駆動機構の総合）”，日本機械学会論文集（C 編），vol.50, no.455, pp.1292–1297, 1984.
[3] 下山：“竹馬型二足歩行ロボットの動的歩行”，日本機械学会論文集（C 編），vol.48, no.433, pp.1445–1454, 1982.
[4] 古荘：“動的二足歩行ロボットの制御”，日本ロボット学会誌，vol.1, no.3, pp.182–190, 1983.
[5] DADS Users' Conference. サイバネットシステム（株），1992.
[6] メカニカル CAE 機構設計解析技術セミナー.（株）電通国際情報サービス，1988.
[7] 遠山：機械のダイナミクス—マルチボディ・ダイナミクス—．コロナ社，1993.
[8] 藤本，河村：“床との衝突および摩擦を考慮した 2 足歩行ロボットの三次元運動シミュレーション”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.6, pp.857–1997, 1997.
[9] 黄：“二足歩行ロボットのシミュレータの開発”，機械研ニュース，no.5, pp.2–4, 1999.
[10] 吉野，高橋：脚式移動ロボットの歩行制御装置，特許第 2819353 号，1998.
[11] 山口，高西，加藤：“路面形状に偏差のある環境における 2 足歩行制御—未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現—”，日本ロボット学会

誌，vol.13, no.7, pp.1030–1037, 1995.
[12] 伊藤："歩行運動とリズム生成"，日本ロボット学会誌，vol.11, no.3, pp.320–325, 1993.
[13] 池田："最適レギュレータ—古くて新しい設計法—"，システム制御情報チュートリアル講座'89 制御工学へのガイドライン—最新の理論のプロファイルと適用の実際—テキスト，pp.1–17，システム制御情報学会，1989.
[14] 美多："高速二足歩行ロボットのディジタル制御"，コンピュートロール，no.2, pp.76–87, コロナ社，1983.

付録 A. 式 (14), (15) の検討

以下に本歩行パターンのピッチ面内の運動の各姿勢における $\boldsymbol{J}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Z}, \boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}, \boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}$ の数値を示す．

A.1 遊脚中央時

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} 11.7 & 6.71 & 5.58 & -1.02 & -0.71 & -0.07 \\ 6.71 & 11.0 & 4.51 & -1.38 & 0.51 & -0.05 \\ 5.58 & 4.51 & 9.91 & -1.11 & 0 & 0 \\ -1.02 & -1.38 & -1.12 & 3.57 & -0.80 & 0.02 \\ -0.71 & -0.51 & 0 & -0.80 & 2.93 & -1.04 \\ -0.07 & -0.05 & 0 & 0.03 & -1.04 & 1.16 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 0 & 4.13 & 1.49 & -1.04 & 0.26 & 0.03 \\ -4.13 & 0 & -1.29 & -0.44 & -0.56 & 0.06 \\ -1.49 & 1.29 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.04 & 0.44 & 0 & 0 & -0.69 & -0.07 \\ -0.26 & -0.56 & 0 & 0.69 & 0 & 0 \\ -0.03 & -0.06 & 0 & 0.07 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Z}=[-69.1 \quad 55.1 \quad 0 \quad -20.7 \quad 12.1 \quad 1.20]^t$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Z}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}=$$
$$\begin{bmatrix} 4054 & -2156 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2156 & 5787 & -3873 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3873 & 7583 & -3873 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3873 & 6064 & -2156 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2156 & 4329 & -2156 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2156 & 2158 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}=\begin{bmatrix} 203 & -102 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -102 & 285 & -183 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -183 & 367 & -183 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -183 & 285 & -102 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -102 & 203 & -102 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -102 & 102 \end{bmatrix}$$

A.2 遊脚離床時

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} 11.7 & 5.47 & 5.69 & -1.42 & -0.52 & -0.05 \\ 5.47 & 11.0 & 3.77 & -1.26 & -0.03 & -0.00 \\ 5.69 & 3.77 & 9.91 & -1.12 & 0 & 0 \\ -1.42 & -1.26 & -1.12 & 3.57 & -0.72 & 0.04 \\ -0.52 & -0.03 & 0 & -0.72 & 2.93 & -1.04 \\ -0.05 & -0.00 & 0 & 0.04 & -1.04 & 1.16 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 0 & 5.90 & 0.98 & -0.31 & 0.54 & 0.05 \\ -5.90 & 0 & -3.07 & -0.72 & -0.75 & 0.07 \\ -0.98 & 3.07 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.31 & -0.72 & 0 & 0 & -0.64 & -0.06 \\ -0.54 & -0.75 & 0 & 0.64 & 0 & 0 \\ -0.05 & -0.07 & 0 & 0.06 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Z}=[-45.2 \quad 132 \quad 0.02 \quad -1.83 \quad 17.5 \quad 1.69]^t$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Z}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}=$$
$$\begin{bmatrix} 4048 & -2156 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2156 & 5819 & -3873 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3873 & 7584 & -3873 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3873 & 6070 & -2156 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2156 & 4324 & -2156 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2156 & 2158 \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}$：遊脚中央時と同じ

A.3 遊脚着床時

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} 11.7 & 5.91 & 4.93 & -0.31 & -0.57 & -0.05 \\ 5.91 & 11.0 & 4.62 & -1.11 & -0.75 & -0.07 \\ 4.93 & 4.62 & 9.91 & -1.12 & 0 & 0 \\ -0.31 & -1.11 & -1.12 & 3.57 & -0.51 & 0.06 \\ -0.57 & -0.75 & 0 & -0.51 & 2.93 & -1.04 \\ -0.05 & -0.07 & 0 & 0.06 & -1.04 & 1.16 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 0 & 5.38 & 3.01 & -1.42 & -0.50 & -0.05 \\ -5.38 & 0 & -0.61 & -0.94 & -0.05 & -0.01 \\ -3.01 & 0.61 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.42 & 0.94 & 0 & 0 & -0.45 & -0.04 \\ 0.50 & 0.05 & 0 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0.06 & 0.01 & 0 & 0.04 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Z}=[-139 \quad 26.1 \quad 0.02 \quad -29.4 \quad -3.55 \quad -0.60]^t$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Z}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fp}=$$
$$\begin{bmatrix} 4084 & -2156 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2156 & 5782 & -3873 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3873 & 7584 & -3873 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3873 & 6057 & -2156 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2156 & 4333 & -2156 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2156 & 2158 \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{Fv}$：遊脚中央時と同じ

以上の数値と歩行実験結果からリンクの角速度は数 [rad/sec]，角加速度は数 10 [rad/sec^2] であることより式の左辺は右辺より十分小さいと考えられる．

付録 B. LFB と IFB の固有値の比較

遊脚中央時の姿勢の場合の $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{Q}, \boldsymbol{R}, \boldsymbol{Kq}, \boldsymbol{K}$ および固有値を以下に示す．

B.1 ピッチ面内の運動

$$
\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\
-764 & 519 & 214 & -284 & -37.9 & 25.3 & 10.6 & -13.4\\
598 & -1114 & 911 & -237 & 29.1 & -54.4 & 43.4 & 25.5\\
157 & 590 & -1168 & 538 & 8 & 28.2 & -56.4 & 25.5\\
-9 & -142 & 1172 & -1066 & -0.7 & -7.1 & 55.5 & -49.8
\end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0\\
15.6 & -22.6 & 2.87 & 13.5\\
-6.98 & 22.4 & -32.4 & 11.2\\
-5.38 & 2.72 & 31.1 & -25.6\\
2.12 & 1.43 & -5.72 & 50.1
\end{bmatrix}
$$

$$\boldsymbol{Q}=diag[200\quad 200\quad 200\quad 200\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0]$$

$$\boldsymbol{R}=diag[0.5\quad 0.5\quad 0.5\quad 0.5]$$

このときリンクフィードバックのゲインは

$$
\boldsymbol{Kq}=\begin{bmatrix}
20.4 & -9.91 & -16.5 & -1.13 & 4.41 & -1.56 & -3.05 & -0.05\\
19.1 & -1.75 & -10.2 & 1.37 & 3.21 & -0.95 & -2.00 & 0.10\\
14.1 & -1.79 & -1.89 & 3.69 & 1.60 & -0.38 & -0.78 & 0.20\\
11.8 & -1.55 & -2.80 & 7.59 & 0.26 & 0.04 & 0.06 & 0.20
\end{bmatrix}
$$

となる．このときシステムの固有値値は

固有値 $=(-80.05\quad -35.8\pm 19.3i\quad -14.6\pm 20.5i\quad -4.61\pm 5.97i\quad -32.7)$

となる．傾斜フィードバックのゲインは

$$
\boldsymbol{K\varphi}=\begin{bmatrix}
20.4 & 4.41\\
19.1 & 3.21\\
14.1 & 1.60\\
11.8 & 0.26
\end{bmatrix}
$$

となり，固有値は

固有値 $=(-102\quad -33.0\pm 15.3i\quad -15.4\pm 19.7i\quad -4.10\pm 6.26i\quad -19.4)$

となり，リンクフィードバックの固有値と大きな差はなく安定に収束する．

B.2 ロール面内の運動

$$
\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\
-1291 & -1563 & 654 & -28.9 & -35.3 & 14.7\\
-2162 & -3204 & 1287 & -58.6 & 72.5 & 29.0\\
214 & 2969 & -2969 & 4.70 & 66.8 & -66.6
\end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0\\
4.21 & 10.2 & -7.29\\
2.59 & 21.5 & -14.4\\
-2.27 & -0.12 & 33.0
\end{bmatrix}
$$

$$\boldsymbol{Q}=diag[2000\quad 2000\quad 2000\quad 0\quad 0\quad 0]$$

$$\boldsymbol{R}=diag[0.5\quad 0.5\quad 0.5]$$

このときリンクフィードバックのゲインは

$$
\boldsymbol{Kq}=\begin{bmatrix}
-40.4 & 28.7 & 0.50 & -4.89 & 3.21 & -0.02\\
46.2 & -12.1 & 10.1 & 2.39 & -1.11 & 0.32\\
32.5 & -7.54 & 19.5 & 0.64 & -0.05 & 0.34
\end{bmatrix}
$$

となる．このときシステムの固有値値は

固有値 $=(-66.5\pm 42.5i\quad -23.6\pm 38.6i\quad -7.17\pm 14.8i)$

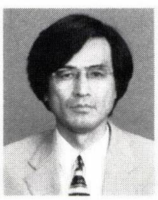
となる．傾斜フィードバックのゲインは

$$
\boldsymbol{K\varphi}=\begin{bmatrix}
-40.4 & -4.89\\
46.2 & 2.39\\
32.5 & 0.64
\end{bmatrix}
$$

となり，固有値は

固有値 $=(-67.5\pm 29.7i\quad -24.8\pm 37.3i\quad -6.51\pm 15.1i)$

となり，同様に安定に収束する．



吉野龍太郎（Ryutaro Yoshino）

1955年11月5日生．1981年東京工業大学精密機械システム専攻修士課程修了．1986年（株）本田技術研究所に入社．現在和光基礎技術研究センターにてロボットの制御システムの研究・開発に従事．

（日本ロボット学会正会員）