

二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム (第2報, ロボティクス入門としての二足歩行ロボット学習プログラム)

川副 嘉彦

埼玉工業大学工学部ヒューマンロボット学科

kawazoe@sit.ac.jp

Practical Education Curriculum Starting from Humanoid Biped Robot —2nd report: Learning Program with Biped Robot as an Introduction to Robotics—

Yoshihiko KAWAZOE

Department of Human-Robotics, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

Mechatronics, dynamics and robotics involving humans are the world of strong nonlinearity. The previous papers demonstrated the robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere even on the ice and snow. The realized simple self-sustained humanlike robust movements use only small active power, with simple chaotic limit cycle using nonlinear optimal control by state transitions with instability. Instability makes the natural movement and can be applied to walking of a physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on. This paper showed the application of the nonlinear optimal control to various movements making full use of instability as a source of driving force and developed into practical education curriculum as an introduction to Robotics with humanoid biped robot.

Key Words: Robotics, Practical Curriculum, Humanoid biped robot, Robustness, Limit Cycle, Nonlinear Optimal Control, State Transition, Human-Robotics

1. はじめに

人間や動物の複雑精妙な運動は、非線形で自由度の多い身体や四肢を巧みに制御して実現される。一方、ロボティクスは、人間や動物の運動機能を機械的に実現しようとするものにほかならない。生体（人間・動物）に似た運動機能を持つもの、あるいは運動機能に加えて知的機能を備えているものというのが最も基本的で本質的なロボットの定義であろう。

ロボット研究に必要な「ロボット制御の理論」とは何かが改めて問われている。様々なロボット制御法が次々と提案される一方で、長きにわたりロボット制御技術の研究やロボットの開発に携わって来た人々の多くに混乱と疑問が生じているという¹⁾。

一方、ロボコンの人間教育的意義については一層の関心もたれており^{2), 3)}、極論すれば、現時点でロボットが唯一貢献できる分野は教育

だけのように見える。

前報⁴⁾では、不安定を利用するシンプルな非線形最適制御を二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラムに展開するために、関節への負担が少ない「ねじらない、うねらない、踏ん張らない」という動きのイメージとして「ナンバ」という用語を使い、俊敏・ロバストなテニスの動きへの応用を試みた。

本報では、ロボティクス入門としての二足歩行ロボット学習プログラムについて紹介する。ロボティクス導入科目として「二足歩行ロボット」から始める理由は、システムとしての制御が難しい多自由度システムにおいて巧みな動きを実現するには様々な知恵が要求され、しかも、その良し悪しが誰でも容易に分かり、学習の全体像と具体的な成果が目に見えやすいからである。一般的なZMP (Zero Moment Point) 制御を実際に適用しようとする、線形理論の限界のために俊敏自在の動きの生成は困難なので、この学習プログラムにおける動きの生成には不安定を利用する非線形最適制御の適用を基本とする⁴⁾。巧みな技術の習熟過程で科学する心が生まれ、科学する心から哲学が生まれることを期待して、具体的実践と問題解決の経験を一般的手法に展開できる能力を養うことが目的である。

2. 不安定を利用する状態遷移による人間型二足ロボットの複雑な動きの制御

全高350mmのロボット⁵⁾⁻¹⁵⁾にとっては凹凸が激しくて摩擦が大小変化する種々の建物の床、廊下、室内、あるいは屋外での歩行・走行も、

蹴らないで転倒力を利用する状態遷移を用いると、図1のようにロバストである¹⁶⁾⁻¹⁷⁾。

図2は、摩擦が極めて小さな氷上という環境においてもロバストな歩行の様子を示す。

摩擦の大きな環境(カーペット)では、ロボットは歩行中の慣性力やトルク不足のために後ろ足のつま先が床に接触して引っかかって90[deg]近く回転したり、後ろに傾斜して転倒したりすることが多い。このような場合は、図3(a)のように、後ろ足先が床に接触しないように、State2とState3の間に(State4とState1の間に)、State2(State4)の姿勢で後ろ足先を少し上げた状態を新しく追加することにより、つまずきやすい凹凸・摩擦の大きいカーペット上を巧みに歩くことができる。図3(a)と同じ状態図を用いて、摩擦が小さくて滑りやすい床での歩行が図3(b)であり、滑りにくいカーペット上でも、滑りやすい床でも、ほぼ同じ前進速度で歩行する。

図4は、うつ伏せからの「起き上がり」である。腕立て伏せのように手を広げて支えるのではなく、両手を身体の下に滑り込ませてから身体を持ち上げ、起き上がる時に重心(お尻)を後ろに移動させ、慣性力による後方への転倒力を利用している。図5は、「仰向け」から「うつ伏せ」を経ての「起き上がり」の実現である。

「仰向け」から「うつ伏せ」への動きは、脚を伸ばして脚の転倒力を利用して身体を横転(仰向けからうつ伏せに)させている。これらの動きの生成はすべて不安定を利用する非線形最適制御を適用したものであり、関節のサーボモータの負担が少ない。

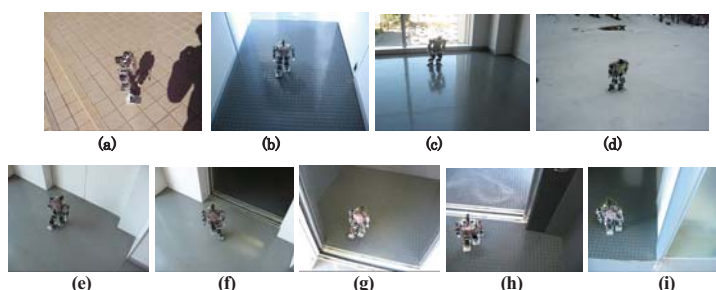


Fig.1 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.

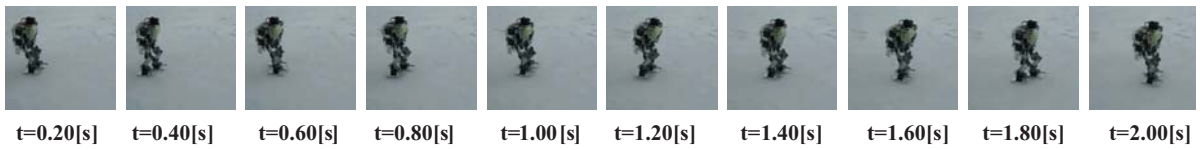
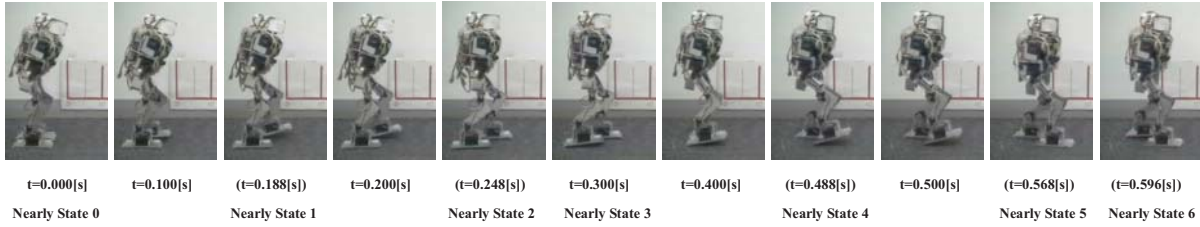
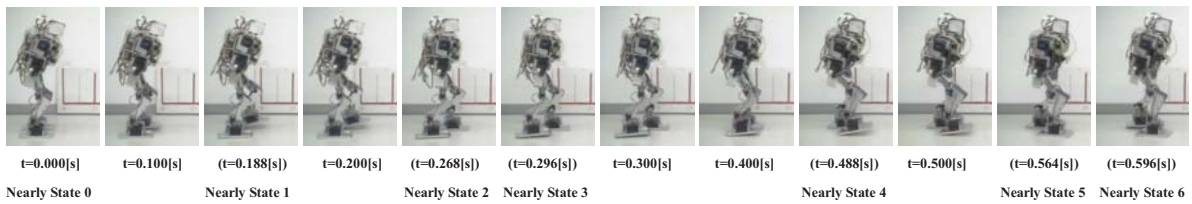


Fig.2 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs even on the ice and snow.



(a) on the carpet with large friction



(b) On the desk with slippery surface

Fig.3 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.

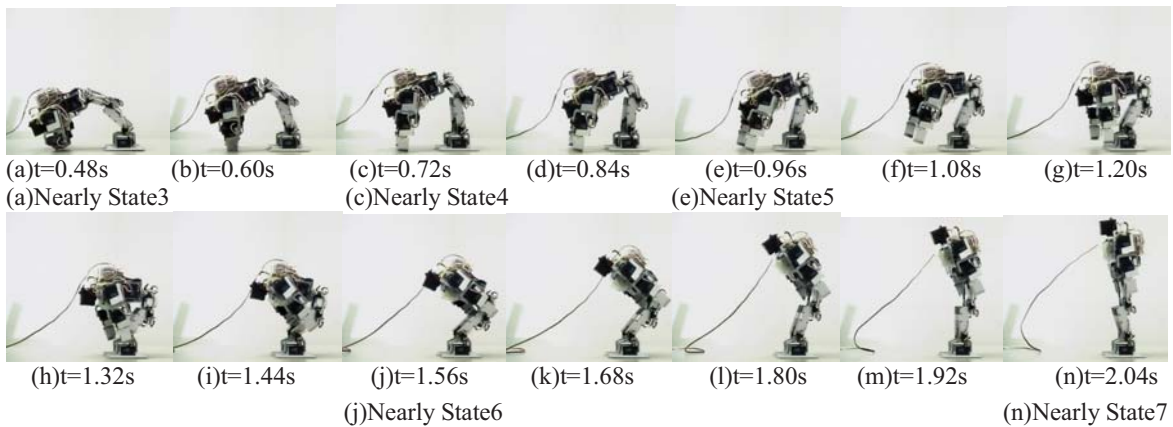


Fig.4 From prone position to rising up using gravitational force.

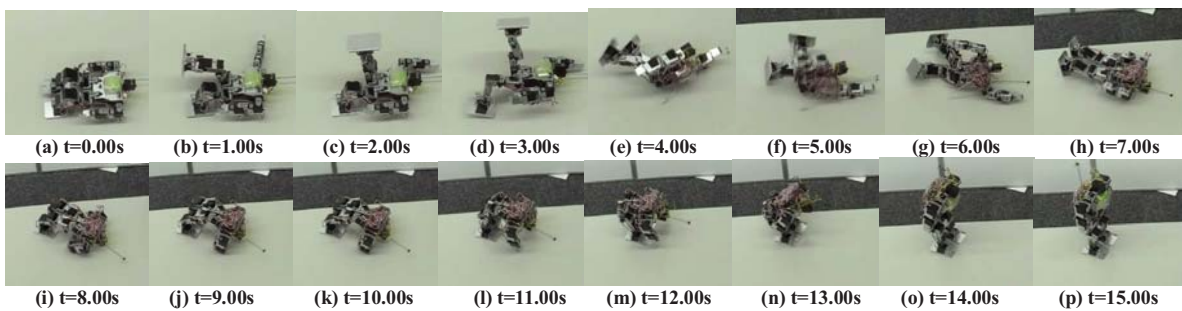


Fig.5 From face up position to prone position and rising up using gravitational force.

3. 包摂構造化に基づく自律行動の生成とプロジェクト型授業カリキュラム

プロジェクト型授業を想定し、サブサンピョンアーキテクチャを基本とした包摂構造化^{4),12),16),17)}をベースにした自律型二足歩行ロボットを用いた学習プログラムの開発を試みた。図6は、使用した機材(脚部10関節二足歩行ロボットKHR-2HV, KONDO 科学製)と各種センサーを示す。センサ特性の測定結果と生成した各種の動きを使って、知覚と要素行動を包摂構造化の手法によりプログラムし、二足歩行ロボットの

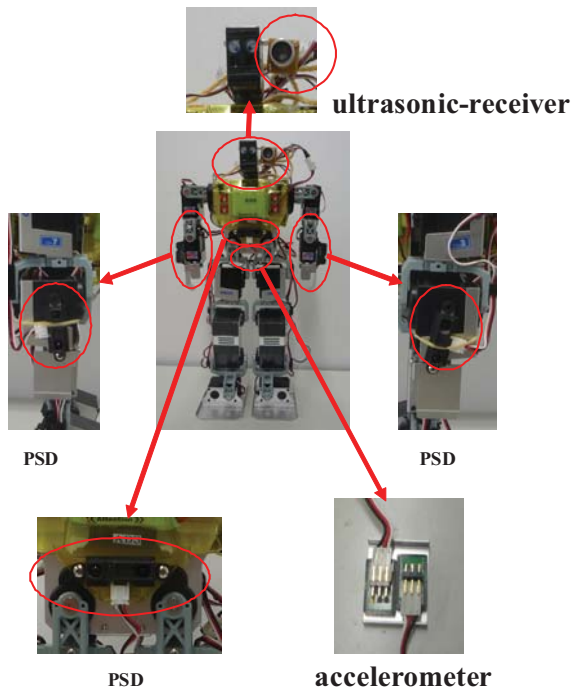
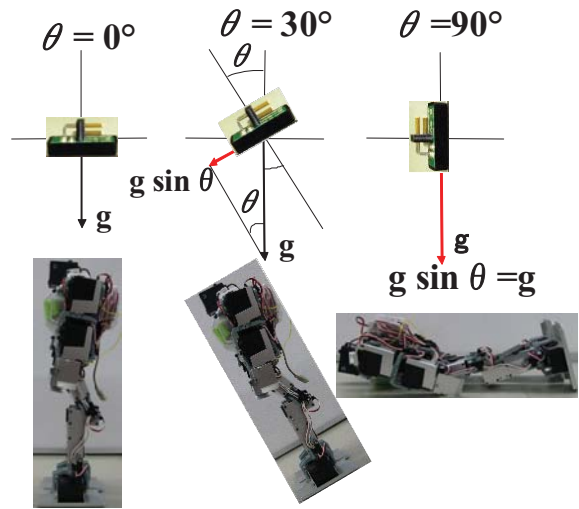


Fig.6 Sensors attached to the robot.



(a) $\theta=0[\text{deg}]$ (b) $\theta=30[\text{deg}]$ (c) $\theta=90[\text{deg}]$

Fig.8 Acceleration vs. Forward leaning angle of biped robot.

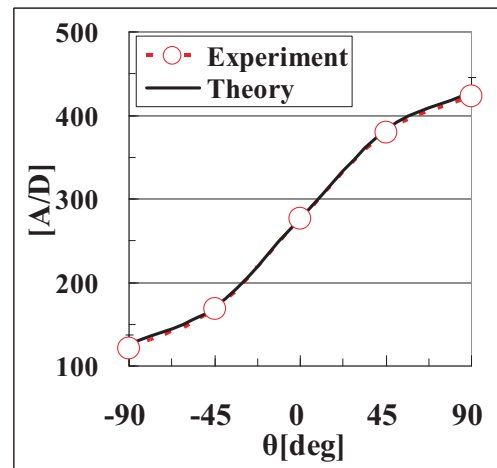


Fig.9 Measured acceleration AD values vs. forward leaning angle of biped robot.

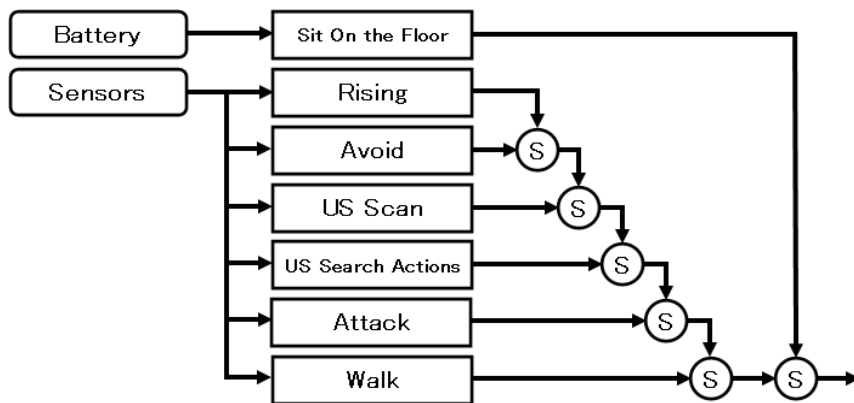


Fig.7 Subsumption architecture in the autonomous robot contest of beach flag.

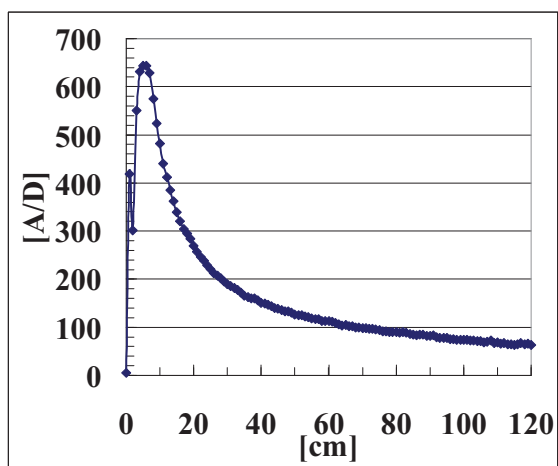
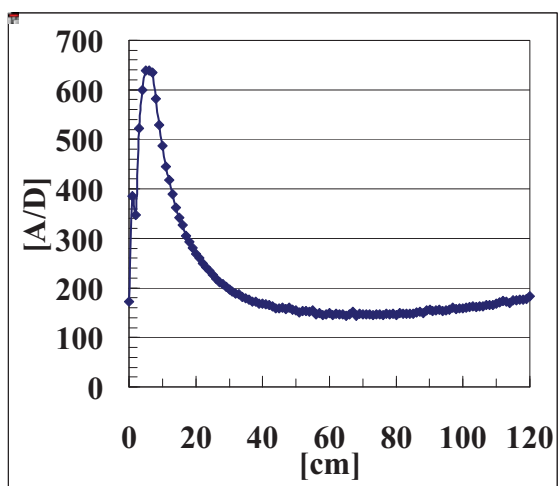
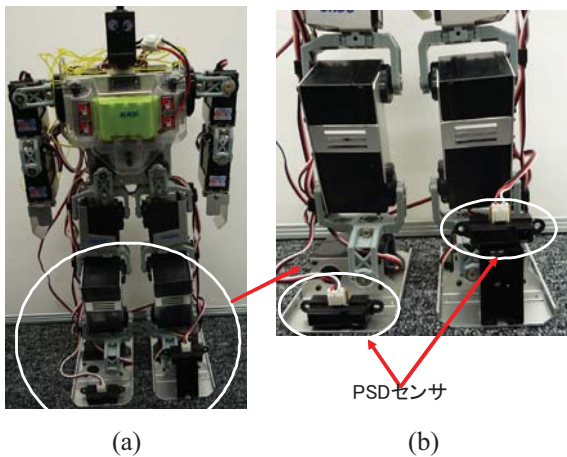
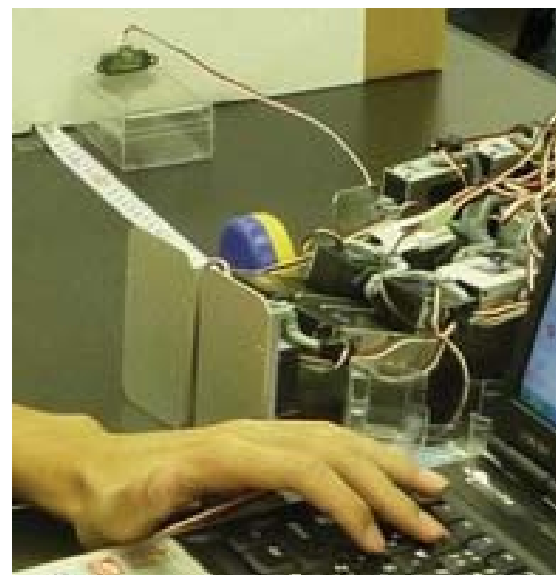


Fig.10 Effect of ground on the PSD sensor AD values

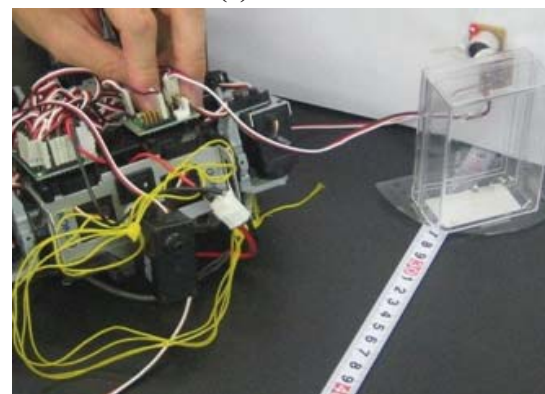
自律行動を実現させる。ロボットの目的行動としては、現在、以下のような自律ビーチフラッグ競技を採用している。ロボットに搭載したセンサの入力情報を頼りに超音波を送信するフラッグに自律的に向かい、フラッグを3分以内に倒すまでの時間を競う競技である。

図7は、包摂構造化によるプログラム構造例である。

図8、図9は機体の傾斜姿勢を認識するための加速度センサ、図10は距離(PSD)センサ特性の測定例、図11は、距離(PSD)センサと超音波受信特性の測定風景、図12と図13はそれぞれ二足歩行ロボット製作演習I(1年生)における1m歩行競技と二足歩行製作演習III(2年生)の発表会(競技会)風景である。



(a) PSD sensor



(b) Ultra-sonic

Fig.11 Measurement of sensor characteristics in class

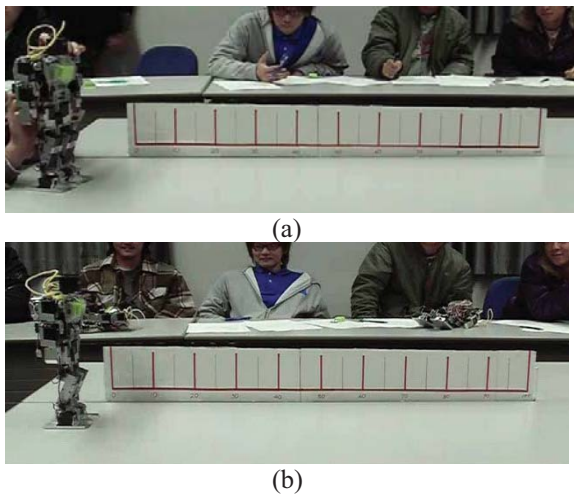


Fig.12 Presentation and contest in the project I .

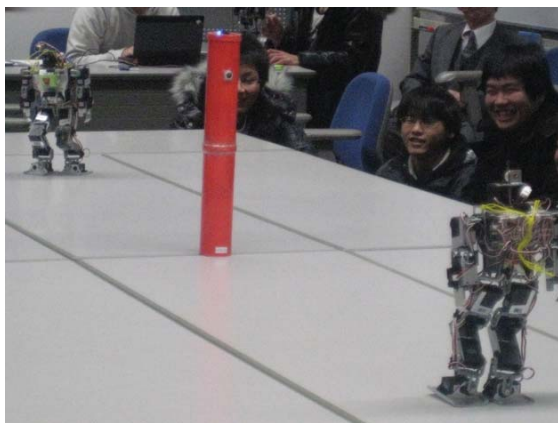


Fig.13 Presentation and contest of autonomous biped robot in the project III.

図 14 は、二足歩行ロボット製作演習Ⅲにおける自律型二足歩行ロボットの突然の外乱(動的障害物)に対する応答性の良さを調べる実験を示す。ロボットがナンバ歩きで前進中に、突然に目の前に出現した障害物に対し急停止し (1.80sec~2.20sec, 約 0.4 秒で停止), 左右の壁までの距離が遠い方に (障害物のない方, 今回は左)にサイドステップし(2.60sec~3.00sec, 約 0.4 秒), 障害物がまだ目前に存在するので, さらにステップした左方向にターンして再び歩き出す (6.80sec~).

図 15 は、二足歩行ロボット製作演習Ⅲの発表会 (ビーチフラッグ競技会) における動きの生成例を示す。図 15(a)は倒れている姿勢をセンサーで検知して起き上がる様子, (b)は前方からは超音波が送信されていないと判断し身体の向きを変えているところ, (c)は超音波を送信しているフラッグ方向へ向かって歩いていく様子, フラッグに接近すると超音波を受信することができなくなり, (d)ではフラッグを見失ったので, 腹部に取り付けた距離センサを使って接近し, フラッグを倒せる位置まで近づいている様子, (e)はフラッグを倒せる位置まで接近したので攻撃モーションでフラッグを倒す様子を示す。それぞれのグループで組み立てた機体と作成したプログラムを

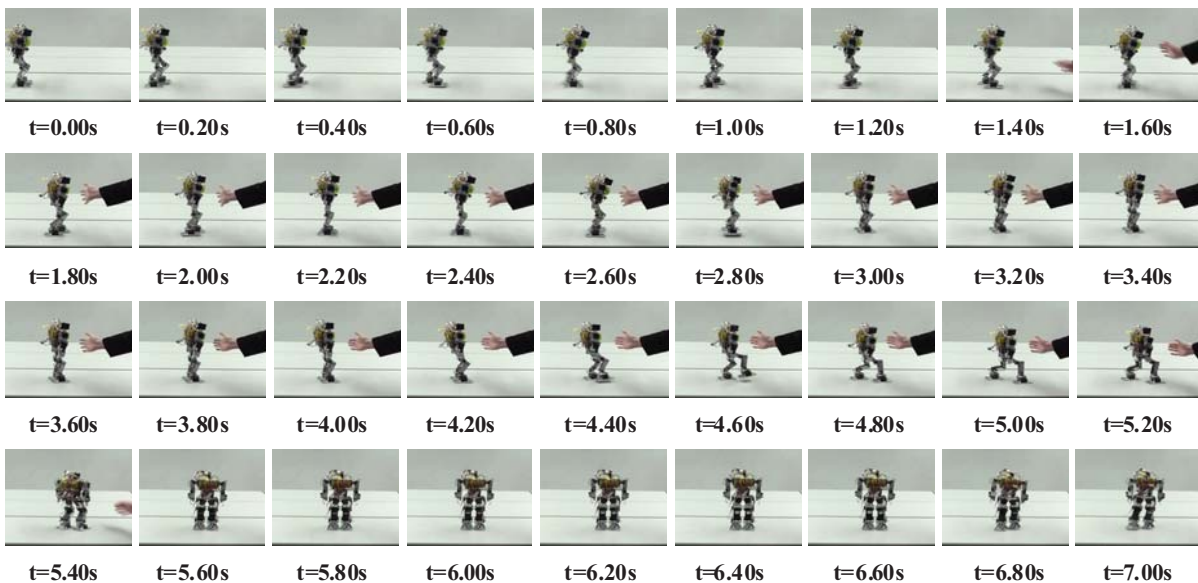


Fig.14 Emergence of simple self-sustained humanlike robust quick stops and instantaneous turns of humanoid biped robot GENBE No.4-2008 for abrupt disturbance during NANBA walking. (30fps)

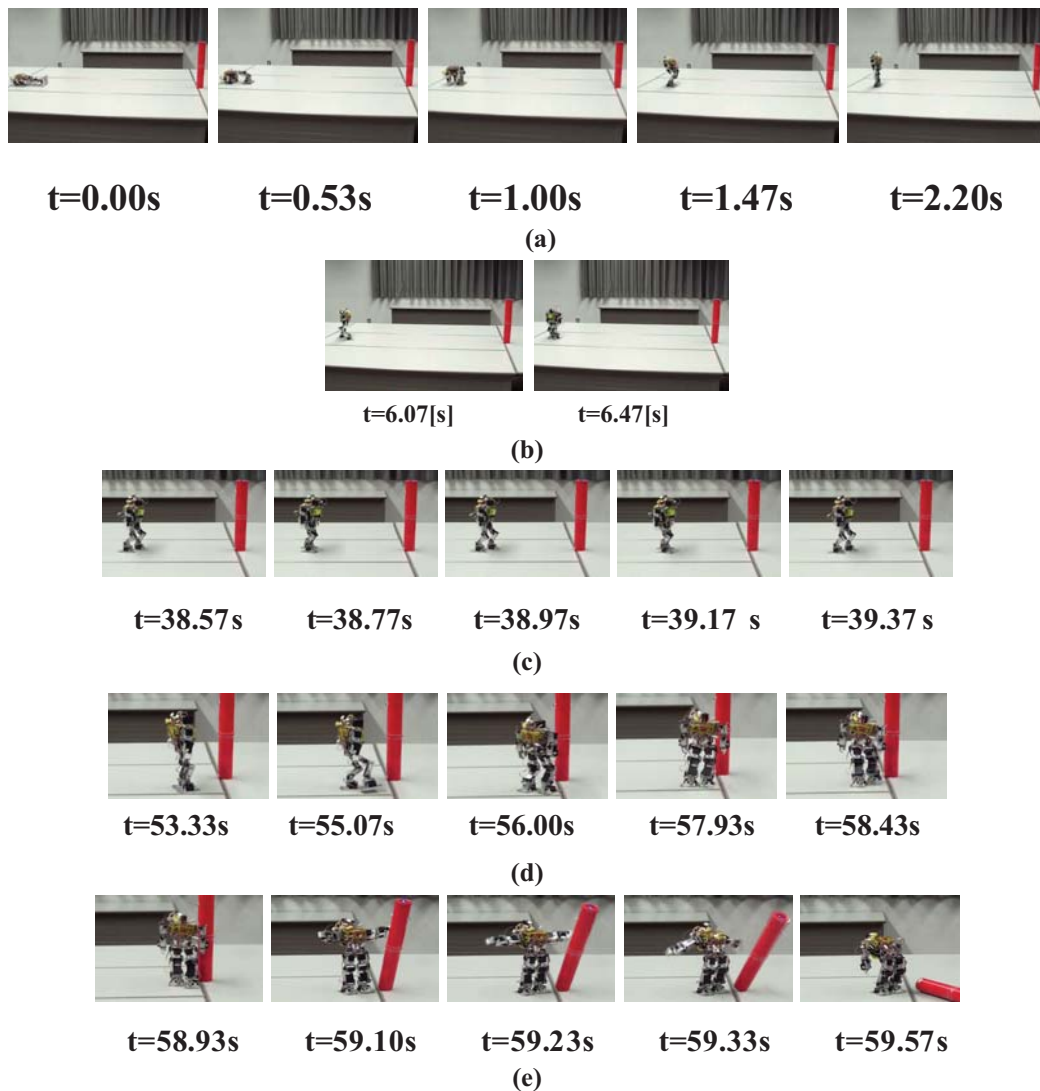


Fig.15 Autonomous beach flag robot contest

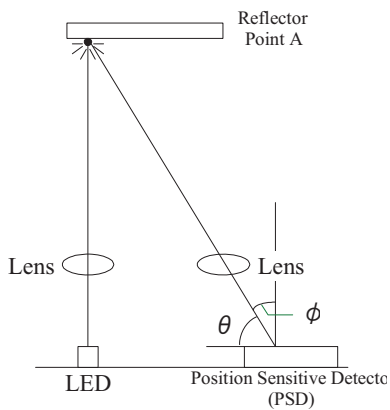


Fig.16 Principle of Position Sensitive Detector.

```

二足歩行ロボット製作法・演習Ⅲ [Beach Flag] C言語資料 2
1. SA 的なプログラムの作成法
ここでは、自律歩行を行い転倒しては起き上がり、また歩き出すプログラムの例を示す
----- センサ取り付け位置 -----
AD port1=ad1:加速度センサ
-----
#include<com.h>
#include<led.h>
#include<rcob3.h>
#include<ad.h>
/* --- RCB3 モーションリスト --- */
#define HP 1 //ホームポジション
#define KAMAE 26 //構え
#define UTURUSE 43 //起き上がり (うつ伏せ)
#define AOKUNE 55 //起き上がり (仰向け)
#define ARUKIL 32 //歩行 (左足上げ)
#define ARUKIR 33 //歩行 (右足上げ)
#define STOP 28 //歩行停止
-----
----- 加速度センサ -----
ADport1=ad1:加速度センサ
ad1>420=うつ伏せ
ad1<150=仰向け
-----
int kasokudo_sensing(int *act) {
if (ad1>420 || ad1<150) { //加速度センサの AD 値が ad1>420 または ad1<150 の場合
return(*act-1); //転倒とみなし、LV=1[okiagaru]にとぶ
}
return(*act=2); //それ以外の AD 値の場合は、転倒していないとみなし、
//LV=2[hokou]にとぶ
}

```

Fig.17 Programming with Subsumption Architecture.

二足歩行ロボット製作法・演習Ⅲ [Beach Flag] C言語資料4

1. AD 値の最大値を探す

ここでは、超音波センサを使い超音波センサの受信 AD 値の最大値を求め、最大値から方向を求めるプログラム(サブルーチン)の例を示す。

このプログラムはサブルーチンであるため、これだけでは動作せず、また組み込むためには必要に応じて各部を調整する必要がある。(組み込み位置は Sensing を想定している)

ロボットの上半身を基準にロボットの頭が右 90 [deg] を向いている状態を $\theta=0$ [deg] とし、左回りを正とする。超音波センサとロボットの頭向きが同じ方向になるように取り付けてある。

```

<必要なモーション>
頭を 0[deg] から 180[deg] まで 30[deg] ずつ動かしたモーション(計 7 モーション用意する)
#define SCAN_0 2 //  $\theta = 0$  [deg]
#define SCAN_30 3 //  $\theta = 30$  [deg]
#define SCAN_60 4 //  $\theta = 60$  [deg]
#define SCAN_90 5 //  $\theta = 90$  [deg]
#define SCAN_120 6 //  $\theta = 120$  [deg]
#define SCAN_150 7 //  $\theta = 150$  [deg]
#define SCAN_180 8 //  $\theta = 180$  [deg]

LV (-) *act センサ取り付位置
0: none ad2: PSD (右)
1: 起き上がり ad3: PSD (左)
2: 歩行 ad6: 超音波センサ

/*****
--- Ultra-Sonic-Search (超音波探索) ---
*****/

より優先度の高いものがあつた場合(起き上がり等)実行せずに離脱する

正面からの超音波入力値が
us>110[AD] ならば前方に目標が存在するとみなしルーチンを離脱する
us<110[AD] ならば目標をロストしたとみなし最も AD 値の大きい方向を探す

us_max : 最も大きい AD 値を格納する
 $\theta=90$  [deg] : ロボット正面
us[0] :  $\theta = 0$  [deg]
us[1] :  $\theta = 30$  [deg]
us[2] :  $\theta = 60$  [deg]
us[3] :  $\theta = 90$  [deg]
us[4] :  $\theta = 120$  [deg]
us[5] :  $\theta = 150$  [deg]
us[6] :  $\theta = 180$  [deg]

```

Fig.18 Programming with ultrasonic search.

二足歩行ロボット製作法・演習Ⅲ [Beach Flag] C言語資料6

1. 競技のためのプログラムの調整

1~5 までの資料で自律歩行と目標の探索が可能となったが、それだけでは自律ビーチフラッグ競技を行うのに不十分である。

目標に近づいたときの行動(調整)やフラッグの死角に入らないようにすることが必要である。

現状では、フラッグの超音波照射ラインより 45° 以上離れた場合や、フラッグに近すぎた場合などに受信機の AD 値が大幅に減少し、ロボットの前面にあるものが障害物なのか目標なのかを判断することが困難である。よって解決策として送信機をフラッグの四方に取り付けなければならないが、ここではプログラムの工夫によっての問題解決を目指す。

下線部、要調整箇所(各班で最適化を行う必要がある)

以下ソースコード【例】

```

/*****
--- センサ取り付位置 ---
*****/

AD port1:加速度センサ
AD port2:PSD センサ(右)
AD port3:PSD センサ(左)
AD port4:PSD センサ(前)
AD port5:PSD センサ(後)
AD port6:超音波センサ
AD port7:none

/*****
#include(com.h)
#include(led.h)
#include(rcrb3.h)
#include(gd.h)

/* --- RC83 モーションリスト --- */
#define HP 18 //ホームポジション
#define KMAE 43 //構え(歩行)
#define UTUBUSE 42 //起き上がり(うつ伏せ)
#define ADUKE 57 //起き上がり(仰向け)
#define ARUKI 45 //歩行
#define STOP 47 //歩行停止
#define TURN_L 53 //ターン(左)
#define TURN_R 54 //ターン(右)
#define STEP_L - //サイドステップ(左)
#define STEP_R - //サイドステップ(右)

#define SCAN_0 60 //  $\theta = 0$  [deg]
#define SCAN_30 61 //  $\theta = 30$  [deg]
#define SCAN_60 63 //  $\theta = 60$  [deg]

```

Fig.19 Programming with tuning for competition.

評価シート

競技の評価

審査項目 (審査基準)	1	2	3	4	5	6	7
アイデア(新規性)							
技術(学習性)							
芸術(美しさ)							
努力(出場回数)							

3(普通)を基準とした
±2段階の5段階

TAと同等級あるいはそれ以上は6, 7

極端に低い(1,2)評価
や高い(6,7)はコメントを記入。

Fig.20 Example of estimation sheet.

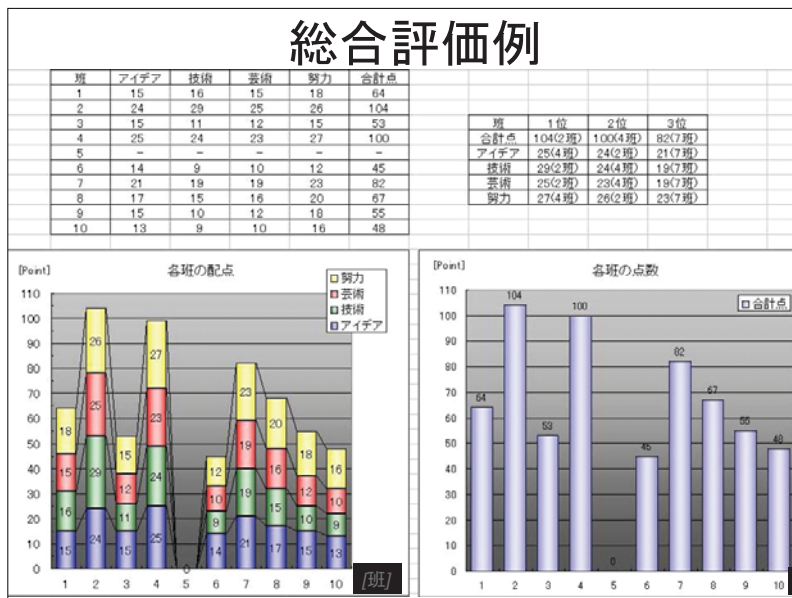


Fig.21 Example of estimated results in the project.

使うので、グループ固有の特長があり、競技は非常に興味深い。

授業のなかでは、たとえば、測距センサー (PSD) の原理 (図 16), サブサンクション・アーキテクチャ (包摂構造) による自律行動のプログラミング (図 17), 超音波送信方向探索のプログラミング (図 18), 競技のためのチューニング微調整プログラミング (図 19) など, 種々の実践的・総合的な学習が可能であり, 図 20 は発表会 (競技会) 評価シートの例, 図 21 は総合評価結果の例である。授業の課題や内容は, TA (Teaching Assistant) が事前に卒業研究やゼミで実際に実施したものを基本にして, 受講生のグループにはできるだけ自力で新しい発想にチャレンジするように指導する。受講生に能力の個人差があってもグループで協力して目的を達成するように指導する。ロボコンを原点とした身心不離の世界を目指している。発表会 (競技会) における評価には担当教員のほか, TA, 学生自身も参加し, TA のデモを評価の基準とし, 評価項目ごとに TA に近いパフォーマンスの場合は 5 段階の満点の評価になり, TA のパフォーマンスを超えると満点以上になることもある。異常に低い評価と TA を超える評価に対してはコメントを必須にしている。したがって, TA が非常に重要な役割をする。TA 自身の教育効果も高く, 教員希望者には貴重な教育実習の場にもなる。

4. 結 論

不安定を利用するシンプルな非線形最適制御を応用してロボット系学科の導入科目として「二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム」を大学 1 年の講義から実施した。本報では, その学習プログラムについて紹介した。

ロボティクス導入科目として「二足歩行ロボット」から始める理由は, システムとしての制御が難しい多自由度システムにおいて巧みな動きを実現するには様々な知恵が要求され, しかも, その良し悪しが誰でも容易に分かり, 学習の全体像と具体的な成果が目に見えやすいからである。一般的な ZMP (Zero Moment Point) 制

御を実際に適用しようとする, 線形理論の限界のために俊敏自在の動きの生成は困難なので, この学習プログラムにおける動きの生成には不安定を利用する非線形最適制御の適用を基本とした。包摂構造化を基本とした具体的実践と問題解決の経験を一般的な手法に展開できる能力が養われることを期待したい。

授業そのものも包摂構造化により個々の内容が積み上がっていき次第に充実していくことが理想であり, 今後の課題でもある。

おわりに, 動きの解析のための撮影を長年にわたって快く許可いただいている古武術研究者 (神戸女学院客員教授)・甲野善紀氏および西武池袋コミュニティ・カレッジ・若杉泰介氏に厚くお礼申し上げる。本研究に動機と励ましとご指導をいただいている森政弘 (東工大名誉教授), 養老孟司 (東大名誉教授), 五味隆志 (アプライド・AI・システムズ社), 甲野善紀 (松聲館), 梅谷陽二 (東工大名誉教授), 佐々木正人 (東大教授) の諸先生に深謝する。また, 卒業研究および TA として熱心な協力を頂いた研究室の伊倉良明・筋野駿介・輿水裕矢・原昌彦・武田幸宏・中川慎理・高橋浩太郎・高橋宏和・石川周作・石川恵介ほかの諸君にも深く感謝する。

文 献

- 1) 島田明・大明準治, 「ロボット制御の理論」特集について, 日本ロボット学会誌, 27 巻 4 号, (2009), pp.369.
- 2) 森政弘, ロボコンの人間教育的意義, 日本ロボット学会誌, Vo.27, No.9, (2009), pp.964 - 966.
- 3) 森政弘, 談話: ロボット工学の開拓者, 日本ロボット学会誌, Vo.27, No.9, (2009), pp.1001 - 1004.
- 4) 川副嘉彦, 二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム (第 1 報, 不安定を利用する状態遷移による非線形最適制御の展開), 埼玉工業大学工学部紀要, 第 19 号, (2009), 掲載予定
- 5) 川副嘉彦, ねじらない・うねらない・ためない「ナンバ・テニス」の研究, テニスの

- 科学, 第16巻, (2008), pp.24-27.
- 6) 川副嘉彦・南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰, 古の身体操縦に学ぶ人間型二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現, 第9回運動と振動の制御シンポジウム論文集, 日本機械学会, (2005), pp.514-519.
- 7) 川副嘉彦・須永智文・桃井孝昌, 二足ロボット源兵衛のAnti-ZMPによる瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現, Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM論文集560, 日本機械学会, (2006), pp.1-6.
- 8) 川副嘉彦, 不安定を利用する人間型二足ロボット「源兵衛」に学ぶ関節に負担の少ない身体操法, 福祉工学シンポジウム2006, (2006), pp.301-304.
- 9) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (第1報, 古の身体操法に学ぶ人間型二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, pp.11-23 ,(2005)
- 10) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (第2報, 人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバスト性のメカニズム), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, pp.25-32. (2005)
- 11) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (不安定を利用した二足ロボット源兵衛の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現), 埼玉工業大学工学部紀要, 第16号, pp.3-11 ,(2006)
- 12) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (不安定を利用した自律型二足ロボット源兵衛の瞬間的転倒衝撃回避と起き上がり), 埼玉工業大学工学部紀要, 第16号, pp.13-20 ,(2006)
- 13) 川副嘉彦, 古の身体操法に学ぶ人間とロボットの動きの原理 (人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」から階段登り降りへの展開), 埼玉工業大学工学部紀要, 第17号, (2007), pp.9-18.
- 14) 川副嘉彦, 人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」から「超高速ナンバ走り」への展開, 埼玉工業大学工学部紀要, 第17号, (2007), pp.19-29.
- 15) 川副嘉彦・伊倉良明, 人間型二足ロボット「源兵衛」による身体に負担の少ない歩行・走行・起き上がり, 福祉工学シンポジウム2008 講演論文集, No.08-28, 日本機械学会, pp.166-169.
- 16) 川副嘉彦, 人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のロバスト性のメカニズム, 埼玉工業大学工学部紀要, 第18号, (2008), pp.29-41,
- 17) 川副嘉彦, ナンバ歩き・ナンバ走り」を基本とする人間型二足ロボット「源兵衛」のロバスト性の実証, 埼玉工業大学工学部紀要, 第18号, (2008), pp.43-58.