

ロボットと人間が21世紀を生きるための「ヒューマン・ロボット学」の提唱

川副 嘉彦

埼玉工業大学

〒369-0293 埼玉県深谷市普濟寺1690

TEL: 048-585-6824 FAX: 048-585-6717 E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

ABSTRACT

We proposed the concept of Human-Robotics, where robots and engineers should learn and develop in collaboration with each other in the real world on the basis of the dexterity of nature, life and human. We showed as the case studies the simple self-sustained humanlike robust walking & running & instantaneous turn NANBA of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability without ZMP (Zero Moment Point) control, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle utilizing instability, further developing into autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising. Instability makes the natural movement. We also showed the case study of an autonomous robot without SMPA (Sense- Model- Plan- Act) framework. It is based on the development of human's dexterity or proficient skills with Subsumption Architecture (SA) by learning in the real world.

1. ロボットの壁

現在の自動車産業に匹敵するぐらいの規模で21世紀の重要な産業分野としてロボットが期待されている。しかし、少子・高齢化社会に期待されるサービスロボットや介護ロボットなど、我々の周囲に存在して知的に動く（従来の機械とは質的に異なる）機械をロボットと定義するならば、長年の研究にもかかわらず、我々の周りには1体、1匹、1台、あるいは1個のロボットも実在しない。生活分野、公共分野、医療福祉分野等においてロボット技術の多様な利用が期待されているが、現状のロボット技術は、将来の市場拡大に対応したロボット技術の具体的な用途や技術の実現可能性を明確にできないでいる[1]。

作業の精度、速度、効率を追求するモデル・ベーストと呼ばれる従来の知能ロボットは、SMPA (Sense- Model- Plan- Act) と呼ばれ、外界をセンサで認識し、そのモデルを内部に構築し、行動計画を立て、そして実際に行動を起こす。しかし、このような直列方式のロボットは、人間の住む実世界では、障害物が突然現れたような場合に計算に時間がかかりすぎて立ち往生してしまう[1]。

たとえば、二足歩行ロボットとして知られているホンダのASIMO、ソニーのQRIO、産官学のHRP-2などに代表される最先端と言われる二足歩行ロボットは、従来の制御技術を極めた高度な機械であるが、絶妙な制御ゆえに、スペックをひとつ変えるだけでバランスが簡単に崩れてしまう。これらのロボットは、重心とZMP (Zero Moment Point) の制御を歩行の基本とし、重力や慣性力に逆らう歩行法だから、エネルギー的にも無駄が多く、サーボモータの負担も大きく、複雑精妙な制御を必要とし、しかも、実環境における外乱に弱い。高精度なZMP操作の研究も精力的になされているが、俊敏・柔軟な動きが求められる実環境においては精密な測定と計算に頼るZMP制御の限界はもはや明かであろう。また、実世界で必要な行動能力のうち、既存のヒューマノイドで実現されていないのは、(1)全身を駆使して素早く巧みな運動を、(2)多様な姿勢や環境接触と予測困難な外乱やモデル化誤差のもとでロボストに達成することであると指摘されているが、ヒューマノイドに限ったことではなく、ロボットにとって最優先の課題であろう。刻々変化して一瞬たりとて止まることのない現実の環境は、ロボットにとっては危険に満ちており、計算に頼るアプローチをとる限り、制御すべきパラメータが爆発的に増えることになる。ロボットに俊敏・柔軟な動きを期待すればするほど、従来のモデル・ベーストや従来の学習の概念が非現実的なものになる[1]。

最近、ロボット関連プロジェクトのキーワードとして、ロボットやロボティクスという用語に代わって、ロボット・テクノロジー (RT) という用語を目にすることが多い。人間共存型のロボットの実現は相当に先のことになりそうなので、ロボット開発プロジェクトで得られた技術を機械に適用しようということのようである。しかし、自動車が実現してから自動車工学の体系化が始まったように、ロボットの学問や技術の体系、すなわちロボット・テクノロジー (RT) は、ロボットが実現しないことには始まりようがない。本末転倒に見える。

世界のすべての人びとが日本人と同じようにエネルギーを消費するとしたら地球が5つ必要だといわれる。環境問題と省エネルギーもロボットにとって極めて深刻な問題である。

昆虫程度のロボットというような表現をしたり、昆虫のような行動に見えてしまうとして試行錯誤的なロ

ボットの行動アーキテクチャをデメリットと見なしたり, シミュレーションしかやっていないのに人工生命を作っていると簡単に言っているのけたり, ロボットがやがて人間を超えるかもしれないなどと心配する研究者が多いが, これらは自然・生き物・ヒトを理解していないための誤解としか著者には想像できない。ブルックスが指摘するように, 地球の歴史は46億年, 単細胞生物が出現したのが35億年前, 単細胞から昆虫に進化するのに30億年, 昆虫から人類に達するのに5億年。人類が農耕を始めたのが約2万年前, 文字を書くようになったのが5千年前, 専門的知識を所有するようになったのは数百年前である。我々はまだ単細胞さえ作れないのである。地球が生まれてから単細胞が生まれるまでに10億年, しかも昆虫になるまで単細胞時代は30億年も続いたのである[1]。

自然・生き物・ヒトの生態系は, 何が起るかわからない, コンピュータ・シミュレーションが通用しない世界である。われわれの住む世界は, 半分は規則的, 半分はランダムという複雑系である。春夏秋冬, 朝昼晩は確実に巡ってくるが, 去年の春と今年の春は違う, 昨日の朝と今日の朝は違うのである。したがって, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットは動いてみないとわからない。一時期ブームであった人工知能研究にコンピュータ・シミュレーションが通用しないことは20世紀後半の歴史が示した。数千年前の人たちが文字や計算と関係なく暮らしていたことを考えれば, 計算能力は生命(知能: 生きる能力)の極めて微小な部分にすぎないことがわかる。「ロボットがどんなに人間に近付いても問題はない。怖いのは, 人間がロボットになることだ」とチェコの作家イバン・クリーマ氏は言う(ロボットという言葉の世界で最初に使ったチャペックはチェコの作家)。これが日常物理学の常識的な感覚であろう。ロボットが人間に近づく速度より人間がロボットに近づく速度の方が速いように見える[1]。

多くの運動は「無意識」である。日常慣れた動作でも, 意識したとたんにギコチなくなる。原始的な運動系は, おそらく反射系だけで成立しており, 知覚入力がかたに運動出力に結合する。昆虫のように, ごく小さな脳しか持たない動物でも, かなり複雑な行動を行う。試行錯誤は運動系の大切な性質の一つで, ネズミが餌のありかを覚えるいちばん確実なやりかたは, 試行錯誤だそうである。したがって, 運動系は「やってみなけりゃ, わからない」。ヒトの身体内にうごめく情報は, 意識されないもののほうがはるかに多くて, 大半の生物は意識など持たずに生きていられると言われる。ミミズの穴ふさぎ, ゴキブリの動き, モグラの穴掘り, アザラシの泳ぎ, チータの走りは, 「ロボット学」の視点からは極めて知的に見える[1]。

多くの時間と経費を費やして大規模プロジェクトとして展開されてきた日本のヒューマノイド・ロボット研究もようやく一段落したように見える。終わってみると, 生き物や人間の住む現実世界で俊敏・柔軟・ロバストに動くロボットは, 現在の延長線上では実現しそうなことが開発に実際に取り組んできた研究者だけではなく一般にも認識され始めたような気配はあるが, まだ十分に理解されているようには見えない。

「2050年にワールドカップ人間チームに勝つ」という目標をかかげて日本の研究者の提案で始まったヒューマノイド・ロボカップ世界大会において, ヨチヨチ歩き of ロボットがバタバタ転倒する惨憺たる状況について, 専門家は直立二足ロボットに歩かせたり走らせたりするのは本来極めて難しいことだと解説している。しかし, たとえ目標達成の時期が2050年だとしても, あるいは目標自体がユーモアだとしても, ロボットの動きは恐ろしく緩慢で頼りなく, ロボット学会設立時の知的ロボットへの期待からはほど遠い。最初に質が植え付けられていない限り, 上達の過程は始まりようがない。刻々変化する現実世界においては, 俊敏・柔軟・自在に動き回ることができないようなロボットには, 外界モデルも経路計画も無意味であり, 目的を達成することは不可能であろう。ロボットの壁である。現状のロボット研究開発の質を変えない限り, 我々の住む現実世界で動くロボットの実現は不可能であろう[1]。

2. ヒューマン・ロボット学の提唱

2.1 自然・生き物・ヒトの巧みに学ぶ「ヒューマン・ロボット学」

工場の外で働くロボットの実現には, ロボットにも設計者にも適応性・柔軟性が求められる。生き物やヒトの巧みさの発達を包摂構造の観点から吟味すると, 現在展開されている知能ロボット開発における本質的な欠陥を克服するヒントが見えて来る。自然・生き物・ヒトの世界で働くロボットは自然・生き物・ヒトの巧みさの発達に学ぶしかない[1]。従来の SMPA (Sense -Model -Plan -Act) や ZMP (Zero Moment Point) 制御に基づくロボットの実環境における本質的な欠陥を克服し, 人間共存型のロボットや環境保護・省エネのロボットを実現するために, 設計者とロボットとが共に次第に発達していくという「ヒューマン・ロボット学」を提唱する。事例研究として, 不安定を利用する二足ロボットの自在の動きの生成と高速接近する障害物を俊敏に(0.5秒で)回避する移動ロボット[1]を紹介する。

2.2 不安定を利用する二足ロボットの自在の動きの生成

たとえば, ロボットの二足歩行はきわめて難しいと言われてきた。しかし, 二足ロボットの歩きや走りは本当に難しいだろうか。ヒトは誰でも簡単に歩いたり走ったりする。

Fig.1 は, 人間オペレータの手による倒立棒の安定化制御において挙動が ZMP 制御に似た数少ない例であり, 常に目標値に近づけようとする。このオペレータは練習を繰り返したが, 結局, 60秒間の安定化には至らなかった。Fig.2 は不安定を利用した試行錯誤による大胆な動きから試行を重ねて習熟していくと次第に動きが滑らかになり, 倒立棒は静止しているように見える。しかし静止しているのではなく, 絶えず細かく動いており, これが人間の立位あるいは歩行が外乱に対して強いロバスト性をもつ理由であり, 人間型二足ロ

ボット「源兵衛」(Fig.3, Fig.4)の歩行原理である。倒立棒の前方への傾き角度に応じて台車の速度を増すと倒立棒は小さく揺れながらほぼ垂直の姿勢で前方に走る。不安定な形が動きを生むのであり、従来の微小

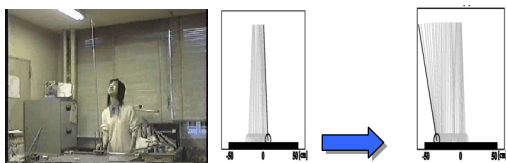


Fig.1 Stabilizing behavior similar to ZMP control (NR01) seems not to become skillful.

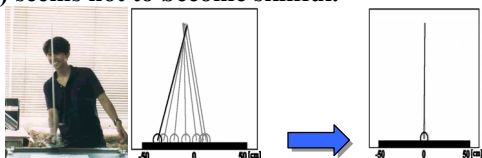
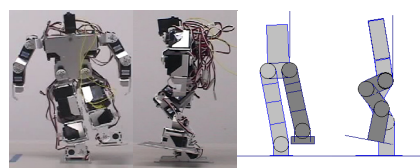
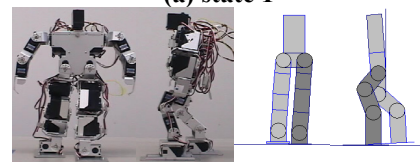


Fig.2 Stabilizing behavior utilizing instability develops from baby walk into NANBA running of biped robot GENBE.

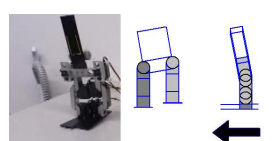


(a) state 1

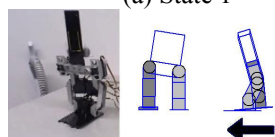


(b) state 2

Fig.4 Fundamental States of NANBA Walking of GENBE- No.4 with 10 freedom legs.

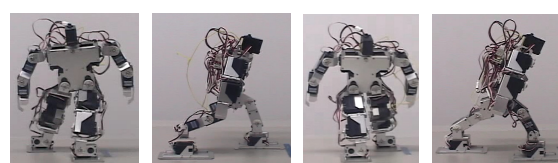


(a) State 1



(b) State 2

Fig.3 Fundamental States of NANBA Walking of GENBE- No.2 with 6 freedom legs.



Front view Side view Front view Side view
(a) state1 (b) state2

Fig.5 Fundamental two states of 180 degrees NANBA TURN.

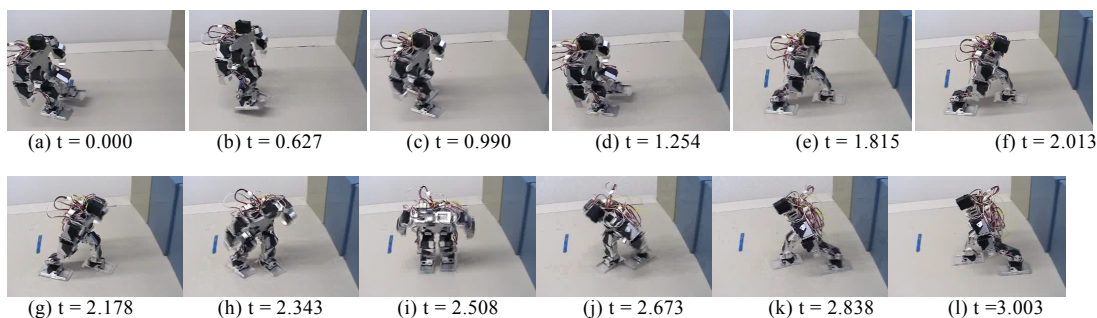


Fig.6 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN of humanoid biped robot GENBE No.4. It turns instantaneously 180 degrees per second.

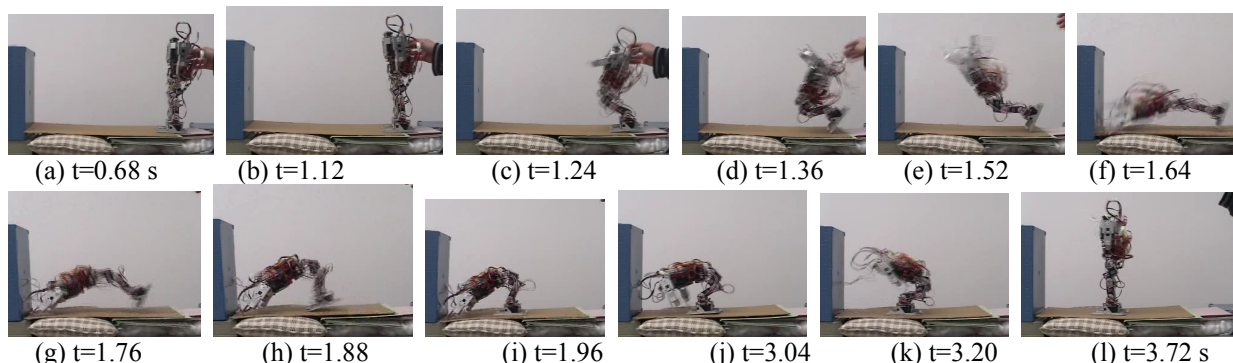


Fig.7 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 2. It takes only 2.5 seconds.

変動の線形制御とは本質的に異なる。Fig.3, Fig.4 では、ロボットは前傾姿勢で膝を曲げて前脚の形を作ると、自然に前方に倒れていき接地する。不安定を利用する（非線形制御による）人間型二足ロボット「源兵衛」のナンバと名づけた歩行・走行は、転倒力と地面により形成された最もシンプルなりミットサイクル・アトラクターであり、自在の速度が可能であり、極めてロバストである[1]。

Fig.5 は、一瞬で 180 度の方向転換をする「ナンバ・ターン」を生成するための二つの状態である。左脚を前に出して前傾で左脚に重心を乗せた状態（状態 1）から右脚を前に出した状態（状態 2）に遷移することにより、その場での瞬間的な 180 度方向転換が Fig.6 のように発現する。歩行してきた流れのまま一気に 1 秒以下の時間で方向転換できる。さらに Fig.7 は、突然うしろから押されて前方へ転倒するとき転倒時の衝撃を最小にするような受け身的な動きと転倒から素早く立ち上がる動きの自律的発現である。センサーにより転倒を認識すると、状態 1 から状態 4 まで（図は省略）一気に遷移する。

2.3 包摂構造化による俊敏な自律移動ロボット

包摂構造を持つロボットは、次第に能力が向上していき、上位レベルの行動（目的行動など）が失敗しても、下位レベルの行動（障害物回避、衝突回避など）が実行され、致命的な失敗を防ぐことができる。人間のような動的障害物も含めて自律的に障害物を回避しながら CCD カメラで床と壁の赤い部分を発見するという目的行動、さらに、坂になった二つの出入口と狭い通路のような複雑な未経験の環境に遭遇したときに、学習の包摂構造化により新しい要素行動を積み上げていく。さらに、速いスピードで接近してくる障害物（実験では転がってくるバレーボール）を回避しながらの目的行動（色探索）も新しい要素行動を追加して積み上げること（包摂構造化）により発現した（Fig.8）。未知の現場で遭遇した課題をオフラインで設計者の介助により試行錯誤的に学習（練習）し、その結果を要素行動として積み上げることにより（包摂構造化）、高速接近する障害物を 0.5 秒で俊敏に回避する。

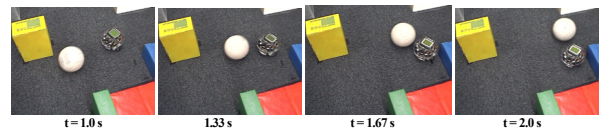


Fig.8 Avoidance (0.5 s) of Mobile Robot 2004 against an approaching high speed ball during searching for Red color.

3. 古武術からのヒント

現代日本人の心身にある問題を武術研究者・甲野善紀が鋭く指摘している[2]。ごく普通の体格をした女性が米俵 5 表・300 キロ（3kN）を背負って歩いている戦前の写真があると言う。ものを担ぐといった単純に見える動きでも、上手に担げば、普通の人の何倍もの重さを担げるのである。「体を上手に使うことで体全体に滞りがなくなり、ある状態から別の状態に一気に変化することができるようになれば、大変な速さを生み、同時に威力も出る」、「筋肉は体が無駄なく上手に動かせるようになるためであるのであって、そうした動きが自然と育つために、必要な形に筋肉がついていくようなトレーニングをすべきだ」と述べているが、筋肉をサーボモータに置き換えれば、まさに不安定を利用する二足ロボット（2.2 節）が目指す自在の動きの生成原理である。

体育を、国語、算数、理科、社会と同じ一教科ではなく、物を作ることや荷物の持ち方、掃除をすることも含めた「人が生きていくための体の使い方を学ぶもの」として学校教育に別枠で組み込むべきだという甲野の指摘は、体育をロボティクスにそのまま置き換えることができる。テレビゲームでも、意外なことは起こるかもしれないが、起こる幅が限られているのに対して、自然の中で遊んでいれば、決められた中から選択するのではなく、ゲームでは得られない無数の展開があると述べている。日本は、一器多用の国であり、手拭の多用な使い方や単純な形を生かして使う箸の技術の例を挙げている。さらに、人間の腕は、さまざまな方向に動かすことができるが、一番無理のない楽な姿勢というものがあって、言葉でも、口に出して体が楽になるような言葉は、拒否の意味には使わず、体は感情とも緊密な関連を持つという。大切な体を育てることが、単なる 1 教科以下の評価しかされていないこと自体が問題であり、たとえば、小学校なら、山に登って、木々や雲の形や岩石などを観察すれば、一味違った理科の授業になるはずだと甲野[2]はいう。ロボットの教育・研究・開発についてもまったく同様であろう。

4. 結論

従来の SMPA 制御や ZMP 制御によるロボットの実環境における本質的な欠陥を克服して「ロボット」および「ロボット学」が 21 世紀に生き延びるためには、省エネ・環境保護を考慮して、設計者（母親）とロボット（赤ちゃん）とが共に次第に発達していくような道筋を基本とし、自然・生き物・ヒトの巧みに学ぶサブサンプリング的研究開発の必要性を指摘し、「ヒューマン・ロボット学」と呼ぶことを提唱し、その事例を紹介した。ロボットが単独で学習することは不可能であり、「真理は作ることそのものにある」という名言は、ヒューマン・ロボット学にもっとも当てはまる。

参考文献

- [1] 川副嘉彦, 2006 年度日本機械学会年次大会講演論文集, No.06-1.(7), (2006), pp.29-32.
- [2] 甲野善紀, 日本人古来の動きを取り戻せ, 中央公論, 2006 年 11 月号, pp.184-192.