

## 2 足歩行ロボットの現状と事例紹介 〈その2〉 早稲田 2 足歩行ロボットの概要

解説

キーワード

2 足歩行ロボット, ヒューマノイドロボット, ZMP, 軌道生成, 運動制御, 協調制御

山口 仁一

早稲田大学理工学総合研究センター

### 1. まえがき

早稲田大学における 2 足歩行ロボット研究は、人間の歩行のメカニズムを工学的視点から解明するとともにヒューマノイドロボットへの応用を目指して 1966 年に開始された。以来、今日までに小型の軽量モデルが 3 機、等身大の重量モデルが 14 機開発され、30 余年にわたって 2 足歩行ロボットの研究が行われてきた。

本稿では、今日までの早稲田 2 足歩行ロボットの歩みと、筆者が中心となって携わった機械モデルのなかで最新型である WABIAN シリーズの設計法とその制御手法について概要を紹介する。

### 2. 早稲田大学における 2 足歩行ロボット研究の歩み

早稲田大学における 2 足歩行ロボット研究は、初期は空気圧駆動による軽量モデルである WAP(Waseda Auto Pedipulator) シリーズと油圧駆動による重量モデルである WL(Waseda Leg) シリーズの 2 系列で研究が行われていたが、1972 年からは WL シリーズ(13 号機から電動式)に一本化された。表 1、図 1 に早稲田 2 足歩行ロボットの歩みを示す。以下、これまでの主要機械モデルについて紹介する。

#### 2.1 静歩行実現まで(1966 年～1972 年)

1966 年に歩行動作の基本的なメカニズム確認を主目的に下肢部モデル WL-1(Waseda Leg No.1)が試作され、1968 年には複動型シリンダを電気油圧サーボ方式で制御する操縦型モデル WL-3 が製作された。そして、WL-3 により人間の遊脚および立脚動作、さらに 2 足での直立および座位状態保持が実現された。また、同時期に 2 足歩行ロボット開発の前段階として、空気を作動媒体に用いたゴム人工筋の試作、2 重倒立振子モデルによる平衡保持制御手法の検討が行われた。

1969 年から 1971 年にかけてはアクチュエータにゴム人工筋を用いた人間形空気圧式 2 足歩行機械 WAP シリーズが試作された。1971 年には軽量 10 自由度 3 次元モデル WAP-3(5[kg], 身長 83[cm])<sup>(1)</sup> により、平地、斜面、階段の歩行、平地での方向転換が実現された。これは、世界初の 3 次元自動 2 足歩行(静歩行)の実現であった。

そして、油圧式の重量モデル WL-5(130[kg], 身長 125[cm])が開発された。この機械モデルは、片脚 5、上体 1(左右方向)

表 1 早稲田 2 足歩行ロボットの歩み

年	ロボット名	研究成果
1966-7	WL-1	人間の下肢部の基礎データの解析およびモデル化
1968	WL-2	人間の平地歩行時の各関節角度の解析
1969	WAP-1	ティーチング・プレイバック制御による 2 次元 2 足歩行実現
1969	WL-3	マスター・スレーブ方式により立位、座位を実現
1970	WL-4	上体に負荷 35[kg] を載せた状態で、上体水平保持実現
	WAP-2	足裏の圧センサからのフィードバック自動姿勢制御の試み
1971	WAP-3	平地、斜面(10%)、階段(0.1[m])の歩行、方向転換実現
	WL-5	マニュアル操作で直進歩行、方向転換実現
1972	WL-5	静歩行実現(直進時 歩幅 0.17[m], 1 歩 40 秒, 方向転換 15[deg]に 40 秒)
1973-7	WL-8D, 7D, 8D	ZMP 制御による研究提案
1978-9	WL-8D, 9D	準動歩行制御方式を提案
1980	WL-9DR	平均台型準動歩行(歩幅 0.45[m], 1 歩 10 秒)実現
1981	WL-9DRmkII	平均台型準動歩行(歩幅 0.45[m], 1 歩 6 秒)実現、足首部に力制御機能を付加
1982-3	WL-10, 10R	平均台型準動歩行(1 歩 4.4 秒)実現、面歩行実現
1984	WL-10RD	(平行型)動歩行実現(1 歩 1.5 秒)
1983-5	WHL-11	日立製作所作成、平均台型静歩行実現、科学万博出展
1985	WL-10RD	斜面、階段歩行(1 歩 2～5 秒)の実現
1986	WL-12	上体補償型動歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 2.6 秒)実現
1987	WL-12R	既知の外力(後方 100[N])下での動歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 1.3 秒)実現
1988	WL-12RV	未知外力(後方 100[N], 0.16 秒)下での動的足踏みを実現(計算オフライン)
	WL-12RV	視覚(2 つの CCD カメラを腰部に搭載)情報を用いた自動障害物踏ぎ越え実現
1989	WL-12RV	未知外力(後方 100[N], 0.30 秒)下での動的足踏み実現(計算オンライン)
	WL-12RV	上体補償型不整地歩行(斜面 ±10[deg] および階段 0.1[m])実現
1990	WL-12RV	未知外力(横方向 100[N], 0.16 秒)下での動的足踏み実現(計算オンライン)
	WL-12RV	実測 ZMP を用いた上体軌道の学習制御方式を提案
1991	WL-12RV	未知外力(100[N], 0.18 秒)下での動歩行(歩幅 0.1[m], 1 歩 0.84 秒)実現
1991-2	WL-12RV	高速動歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 0.50 秒)実現
1992	WL-12RV	未知の凹凸路面(±12[mm])に対する適応歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 0.96 秒)実現
	WL-12RH	下肢軌道最適計画アルゴリズム、下肢軌道学習歩行制御方式を提案
1993	WL-12RT	実測 ZMP および人間の介助力情報を用いた学習歩行制御方式の提案
1993	WL-12RVII	動的な方向転換を含む完全歩行を実現
1994	WL-12RVII	形状が未知の路面に対する適応歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 1.28 秒)実現
1994-5	WL-13	変形する路面(畳など)に対する適応歩行(歩幅 0.3[m], 1 歩 1.28 秒)実現
1996	WL-14	関節駆動型 2 足動歩行(歩幅 0.1[m], 1 歩 7.68 秒)を実現
1996-7	WABIAN	関節駆動型 2 足動歩行(歩幅 0.2[m], 1 歩 1.28 秒)を実現
	WABIAN	任意の手先および下肢軌道に対応した 2 足動歩行を実現
1997	WABIAN-R	ハンドを介した人間追従 2 足動歩行を実現
	WL-14	全身協調型 2 足動歩行を実現、GUI を備えた軌道生成ソフトウェアを開発
	WL-14	人間の歩容をモデルとした関節駆動型 2 足動歩行を実現(歩幅 0.25[m], 1 歩 1.28 秒)

の合計 11 自由度を持ち、手動で平地歩行と方向転換を実現した<sup>(2)</sup>。1972 年には、コンピュータ制御による自動 2 足歩行を実現し、WABOT-1(Waseda roBOT)のサブシステムとして用いられた<sup>(3)</sup>。

#### 2.2 静歩行から動歩行実現まで(1973 年～1984 年)

1973 年から 1977 年にかけては、動歩行実現のため、上体運動により ZMP (Zero Moment Point)<sup>(4)</sup> を補償する制御方式(ZMP 制御)が各種研究・提案された。しかし、動歩行を実現するには至らなかった。

そこで 1978 年に、静歩行から動歩行への一過程として準動歩行制御方式が提案された<sup>(5,6)</sup>。これは、単脚支持期においては、ZMP 制御で安定を保持し、歩行系が不安定な状態になる立脚切換期においては、立脚側の足首関節以外の自由度を固定し、機械モデルを倒立振子モデルと見なし、立脚切り換え終了直後、機械モデルの重心軌道が足底面内の安定領域に復帰するような歩容を考察し、その歩容を設定歩行パターンとして用いるものである。

1980 年には、平行型準動歩行の前段階として平均台型歩行(目の前の 1 本の直線を左右の足で踏みながら歩くような歩行)による準動歩行が提案され、この歩行を実現するために、足底を従来の 3 点接地からより広い安定領域を確保でき

Development of Waseda Biped Walking Robot.

By Jin'ichi Yamaguchi (Advanced Research Institute for Science and Engineerig, Waseda University).

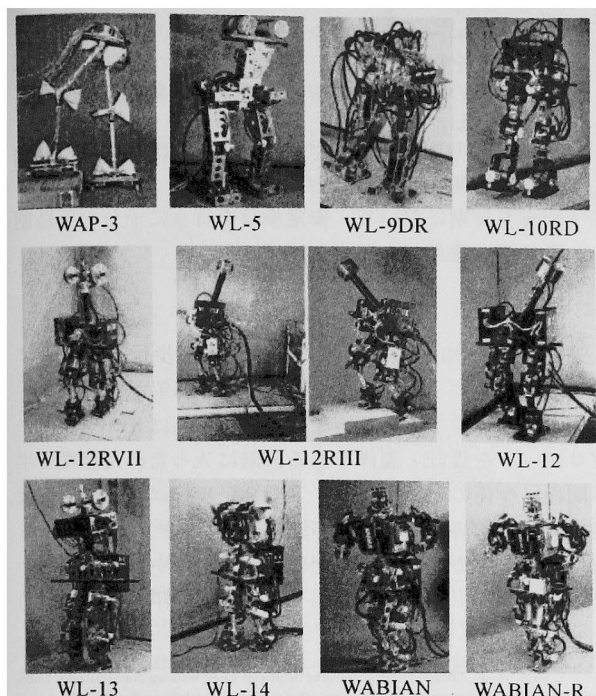


図1 早稲田2足歩行ロボットの歩み

る4点接地に、従来の床反力センサをより確実な接地情報を得られるマイクロスイッチに、さらに軽量化のため従来あった上体部の自由度を無くし、足首部2、膝部1、股部2、両脚合計10自由度の構成とした下肢機構部のみの機械モデルWL-9DR(油圧式, 43[kg], 身長100[cm])が製作された<sup>(7,8)</sup>。この機械モデルに準動歩行制御方式を適用した結果、平均台型準動歩行を実現した。

1984年には、下肢機構部のみの機械モデルWL-10RD(油圧式, 83[kg], 身長144[cm])の膝部、大腿部を除く8自由度に対しトルク制御機能を付加し、歩行開始終了を含む平行型直進動歩行を実現した<sup>(9)</sup>。制御方式は、単脚支持期には、ZMPを歩行の安定判別の規範とする設定歩行パターンを用いたプログラム制御、立脚切換期においては、モデルを3次元倒立振子とみなして解析を行い、接地状況に応じて足関節のインピーダンス制御パラメータを切り替えるシーケンス制御を行う方式であった。

### 2.3 環境適応能力の付加(1985年～1994年)

1984年に動的2足歩行ロボットは完成した。しかし、フィードバックのないシーケンス制御では環境に適応する能力が不十分であり、ちょっとした外乱(路面のわずかな凹凸や小さな外力)ですぐに倒れてしまうという問題があった。

そこで、1985年からは2足歩行ロボットに環境適応能力を付加することを主目的に研究が進められた。

まず、環境適応能力を増大させるために、1980年以来設けられていなかった上体部を再び搭載した2足歩行ロボットWL-12(100[kg], 身長180[cm])が1986年に製作された。WL-12は上体部にバランスウエイト(30[kg])を持ち、自由度構成は、下肢は股部、膝部、足首部に、ピッチのみの6自由度、上体はピッチ、ロール、並進の3自由度の合計9自由度

からなっていた。そして、下肢軌道およびZMP軌道を任意に与え、これらをもとに歩行安定化のための上体補償軌道を算出するアルゴリズムを考案することにより、上体補償型動歩行をプログラム制御により実現した<sup>(10)</sup>。

1987年から1991年にかけては、環境適応能力のなかでも外力に対する適応能力付加を主目的に研究が進められた。1991年には、従来の上体機構部にさらにヨー軸回りのモーメント発生機構を付加することで、3軸回りのモーメント補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RV(104[kg], 身長180[cm])<sup>(11,12)</sup>が開発され、この機械モデルにより、未知外力(100[N], 0.18秒)下での動歩行(歩幅0.1[m], 1歩0.64秒)が実現された。

1992年から1994年にかけては、環境適応能力のなかでも未知の路面に対する適応能力付加を主目的に研究が進められた。1992年には、衝撃を緩衝し路面形状を検知する機能を持つ足底部<sup>(13)</sup>(1990年に原型を開発<sup>(14)</sup>)を有するWL-12RVIIにより未知の段差の昇降に成功した<sup>(15)</sup>。

1993年には、路面/姿勢の絶対傾斜角の検知機構を足底部に付加した2足歩行ロボットWL-12RVII(109[kg], 身長187[cm])により、形状が未知の路面に対する適応歩行を実現した。そして、1994年には、WL-12RVIIを用いて変形する路面上において、具体的には畳の上において、1.28[s/step], 0.30[m/step]のリアルタイム制御下での適応歩行を実現した<sup>(16)</sup>。

### 3. 現在の早稲田2足歩行ロボット

#### 3.1 歩行制御方式の概要

筆者が中心となって携わった機械モデルのなかで最新型であるWABIANシリーズの歩行安定化制御アルゴリズム(計画も含む)は、次に示す4つの安定化制御系から構成される。

- 1)モデルベースト歩行制御(ZMP・ヨー軸モーメント制御)<sup>(17)</sup>
- 2)モデル誤差補償機構(柔らかい足底部)による歩行のロバースト化と歩行状態の検出<sup>(13,16)</sup>
- 3)モデル誤差補償制御(実環境(未知)路面適応)<sup>(16)</sup>
- 4)ZMP・ヨー軸モーメント実時間制御(外力適応)<sup>(11)</sup>

まず、基礎となる1)の安定化制御には、足底と着地路面により形成される支持多角形内部(安定領域内)の任意の位置で、ピッチ、ロール、そしてヨー軸回りの3軸全てのモーメントを全身の協調運動により補償する全身協調補償型2足歩行制御方式を用いている。本歩行制御方式の概要は、“体幹・腰協調型モーメント補償軌道算出アルゴリズム”を用いて、任意の足先軌道、ZMP軌道、そして手先軌道および必要ならば体幹軌道(もしくは腰軌道)から、体幹と腰のモーメント補償軌道を算出し、それらの軌道を設定(目標)歩行パターンとしてヒューマノイドロボットの運動制御を行うというものである。本方式の要である3軸モーメントに対応した体幹・腰協調型モーメント補償軌道算出アルゴリズムの骨子は、以下の3点からなる。

I : ヒューマノイドロボットのモデル化

II : I のモデルにおけるモーメントに関する方程式の導出

III : I の線形化モデルを用いた繰り返し計算により II を満足するモーメント補償軌道(体幹と腰)の厳密解の算出

次に、その上位に位置する2)の安定化機構(主に高周波成分に対する安定化を担当、モデルの動特性を調整し1)、3)と協調的に働くことで効果を発揮する)として、全身協調補償型2足歩行制御方式で考慮していない、機械モデルの構造部材の僅かなたわみなどを原因とする下肢軌道偏差や歩行路面の測定誤差による歩容への影響を除去するために、“衝撃緩衝材料を用いた足底機構部”を用いている。以上の2重の安定化により、例えば、水平なフローリングの床に絨毯を敷いたもののようにならび変形する路面を水平平坦路面とみなしてロボットをプログラム制御しても、その歩行成功確率はほぼ100%となる。

そして、さらにその上位に位置する3)の安定化制御(主に低周波成分に対する安定化制御を担当)として、形状が未知の路面に対応する適応下肢軌道制御ソフトウェアがある。これは本足底機構部の着地路面検知機構より得られる情報を基に下肢軌道を変更・制御することで、足底機構部の歩行安定化機構では対応が困難な路面や、何らかの原因で下肢軌道に偏差が生じた場合においても、動歩行の継続を可能とするものである。このように、高周波成分に対する安定化を機械ハードウェアにより行い、低周波成分に対する安定化をソフトウェアにより行うことで、幅広い周波数帯域における適応制御を可能にするとともに、制御システム全体の負荷を軽減できることが本手法の特徴となっている。

最後に最上位として位置する安定化制御として、未知の外力に対する適応を主目的とする4)の安定化制御がある。この制御方式の概要は、まず、未知の外力が加わるまでは設定歩行パターンを用いて歩行を行い、次に、歩行中に外力が加わった場合、ZMPを設定ZMPに一致させるように体幹運動によりZMP・ヨー軸モーメントを補償し、さらにこのままでは体幹運動が発散してしまうため、ZMP自身の変更、すなわち下肢運動の変更により、これを収束させ歩容の安定化を図るというものである。

### 3.2 設計法の概要

WABIANシリーズの設計法の概要は次のようになる。

- 1)人間の動作分析結果を参考に、上肢、体幹、下肢などの運動に関する目標仕様を決定する。
- 2)人間の身体測定値を参考に関節間距離を(仮)決定する。
- 3)機械モデルの安定歩行時許容最大重量を決定する。
- 4)各関節の(仮)目標仕様を決定しアクチュエータ、ギアを仮選定する。
- 5)連結部材(シャシー)の荒設計を行い、機械モデルの総重量・重量配置を算出する。
- 6)歩行シミュレーションを行い、総重量・重量配置を修正(関節間距離や関節構造の変更で対応)し、各関節の(最終)目標仕様を決定する。

7)アクチュエータ、ギアを(最終)選定し、機械モデルの詳細設計を行う。

なお、各部の剛性・固有振動数は以下の条件を満たすべく決定・調整している。

- ・単脚支持期において、安定歩行を行うに十分なZMP制御精度を確保できること
- ・両脚支持期において、安定歩行を行うに十分な下肢制御精度を確保できること。

### 4. むすび

筆者らが1993年に実環境で継続的安定歩行を可能とする2足歩行ロボットを開発してから、早5年が経過した。現在は、学部学生でも適切な指導を受ければヒューマノイドロボットを設計・製作できる段階に入った(5人程度で半年間程)。今後のヒューマノイド型2足歩行ロボット研究は、従来の基礎的研究の色合いが濃いものから、マイロボット時代の扉を開くための実用化研究へとその中心が移っていくであろう。(平成11年3月31日受付)

### 文 献

- (1) I. Kato, et. al. : "Pneumatically Powered Artificial Legs Walking Automatically Under Various Circumstances", Proceedings of 4th Int. Symposium in External Control of Human Extremities (1972)
- (2) I. Kato, et. al. : "The Hydraulically Powered Biped Walking Machine with a High Carrying", *ibid.*, (1972)
- (3) 加藤(一), 他 : 「2足歩行ロボット(WABOT-1)の開発, 足」, バイオメカニズム2, 東大出版会, pp.173-184, (1973)
- (4) M.Vukobratović(加藤(一), 山下訳) : 「歩行ロボットと人工の足」, 日刊工業新聞社, (1975)
- (5) K. Ogo, et. al. : "Quasi Dynamic Walking of Biped Walking Machine", *Romansy-3*, (1978)
- (6) 雁瀬, 他 : 「油圧式2足歩行機械による準動歩行の研究」, バイオメカニズム5, 東大出版会, pp.269-280, (1979)
- (7) T. Kato, et. al. : "The Realization of Quasi Dynamic Walking by The Biped Walking Machine", *Romansy-4*, (1982)
- (8) 加藤(高), 他 : 「2足歩行機械システムの研究」, バイオメカニズム6, 東大出版会, pp.252-260, (1982)
- (9) 高西, 他 : 「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.82-94, (1985)
- (10) 高西, 他 : 「上体補償型2足歩行制御方式」, 第26回SICE学術講演会予稿集, pp.505-506, (1987)
- (11) 高西, 他 : 「上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発—未知外力に対する適応歩行の実現—」, 第10回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.593-596, (1992)
- (12) 山口, 他 : 「上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.581-586, (1993)
- (13) 山口, 他 : 「衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化と路面位置情報の取得」, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.67-74, (1996)
- (14) 山口, 他 : 「衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化」, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.325-326, (1991)
- (15) 山口, 他 : 「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)
- (16) 山口, 他 : 「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, Vol.14, No.4, pp.546-559, (1996)
- (17) 山口, 他 : 「2足歩行型ヒューマノイドロボットの開発—全身協調型2足歩行制御—」, 第3回ロボティクスシンポジウム, pp.189-196, (1998)

### 山 口 仁 一



1968年2月12日生。1991年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1993年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。1997年同大学大学院理工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)早大。1996年早稲田大学理工学総合研究センター助手。1997年同客員講師(専任扱い)。1997年計測自動制御学会賞(学術奨励賞)、日本ロボット学会第11回論文賞受賞。1998年日本機械学会部門賞 ROBOMECH 賞受賞。人間形2足歩行ロボットおよびヒューマノイドロボットに関する(特に設計法と運動制御)研究に従事。