8C24 ヒトの搬送を目指した2足移動モジュールの開発

Development of a Biped Locomotion Module for Carrying a Human

菅原 雄介・早稲田大学大学院

圓戸 辰郎・早稲田大学大学院

細畠 拓也・早稲田大学大学院

Yusuke Sugahara, Waseda University

Tatsuro Endo, Waseda University

Takuya Hosobata, Waseda University

御厨 裕・早稲田大学大学院

林 憲玉・神奈川工科大学

高西 淳夫・早稲田大学

Yutaka Mikuriya, Waseda University

Hun-Ok Lim, Kanagawa Institute of
Technology

Atsuo Takanishi, Waseda University

Key Words: Biped Locomotor, Design, Motion Control, Biped Walking, Parallel Mechanism

論文要旨

車椅子や歩行支援機などの移動型福祉機器には車輪やクローラが用いられている。これらの移動機構はその適用範囲に限界があり、過剰なインフラ整備が環境に及ぼす弊害も無視できない。本研究の目的は、階段や斜面を歩行できる移動椅子や歩行支援機への応用を目的とし、人間の搭乗も可能な汎用2足移動機構を開発することである。著者らはこれまでに、パラレルメカニズムを用いた脚と腰部のみで構成された2足移動モジュールを開発し、動歩行はもとより高速方向転換、屋外での歩行、50kgの重量物積載歩行などに成功したので報告する。

Abstract

Wheels and crawlers have been used as the locomotion mechanism of welfare systems such as wheelchairs and walk support machines. However, they are difficult to be employed in human-living environments. The purpose of this research is to develop a multi-purpose locomotion system for human-robot symbiosis. The locomotion system can take on a human and support his / her walk on the slopes and stairs. We have developed a biped locomotion system that consists of a waist and two legs with parallel mechanisms, and realized dynamic walking, sharp turning, outdoor walking and walking with 50 kg payload.

1. 緒言

本研究では、福祉分野で実用に足る汎用2足移動モジュールの開発を目的とする。車椅子や歩行支援機など移動型福祉機器の使用環境として考えた場合、人間の住環境は現実的には図1のように乱雑に散らかっている場合が多く、この環境で人間が普通に生活していることを考えると、移動機構としては人間と同様の2足歩行型が望ましいといえる。また、整地やスロープの設置など土木インフラの整備により、バリアフリーの名のもと自然や文化的環境が無残に改変されていく事例は数多くあり、その運用にインフラ整備を必要としないことも歩行型の移動機構のメリットである。米インデペンデンス・テクノロジー社の倒立振子型車椅子アイボット⁽¹⁾の発表は記憶に新しいが、この機械とて踏んではいけないもの

の散らばっている室内では運用できない。

ところが現在のところ、すべての移動型福祉機器は移動機構に車輪やクローラを用いている。この理由は、2足歩行が不安定であるということだけでなく、車輪やクローラのように独立した移動機構モジュールとして扱いにくいことも一因であると考えられる。

そこで著者らは、これまでの2足ヒューマノイド・ロボットに関する研究結果⁽²⁻⁶⁾から、ヒューマノイド・ロボットに関する技術のうち2足歩行に関してのみならば実用化の可能性が探れるものと判断できたので、汎用移動機構モジュールとしての2足歩行ロボットを開発することを着想した。

本研究は、人間の住環境、屋内外、山野なども含めた環境をその対象とし、様々な福祉機器の搭載、また人間の搭乗・搬送も可能な汎用移動機構モジュールとして実用に足る2足歩行ロボット（以降、汎用2足ロコモータとよぶ）を開発することを目的とする。これは、脚と腰部のみで構成され、その上部に運動する重量物を積載しての歩行が可能である汎用移動ロボットを本研究によって提供し、使用者がその要求に応じて機器を架装する、という考え方である（図2）。

対象とする応用分野は、

- ・ 福祉分野：階段や斜面を昇降できる歩行障害者用の移動椅子、歩行支援機等への応用
- ・ 産業分野：産業機械の移動機構への応用
- ・ 芸術分野：インスタレーション装置としての応用
- ・ ヒューマノイド・ロボット分野

などがあげられ、これらの分野での現実的な利用が可能な汎用2足ロコモータの開発を目指す。

Figure 1: Example of a Human-living Environment

Figure 2: Applications of Multi-purpose Bipedal Locomotor

Figure 3: WL-15 and WL-16

著者らはこの発想に基づき、パラレルメカニズムにより構成された特徴的な脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能な汎用2足ロコモータの試作機 WL-15 (Waseda Leg - No.15)⁽⁶⁻⁸⁾、およびその改良機 WL-16⁽⁹⁻¹¹⁾を開発した (図3)。

本稿では WL-15 の開発を中心に、研究成果を報告する。

2. 設計

1-1 概念設計 汎用2足ロコモータの試作機には、自立性や可搬重量、歩行速度、剛性やコストなど多くの機能的要求がある。これらの機能的要求を満足するため、本研究では6自由度パラレルメカニズムに着目した。多くの2足歩行ロボットでは、ごく少数の例を除き脚機構にはシリアルメカニズムが用いられているが、2足歩行にはシリアルメカニズムが最適であると実証されていない。

表1に、一般的なパラレルメカニズムとシリアルメカニズムの比較を示す。パラレルメカニズムはシリアルメカニズムに比べ逆運動学が容易、位置精度が高い、機構剛性や出力が高いといった長所があり、これを脚機構に用いることにより、

Table 1: Features of Serial / Parallel Mechanism

Features	Serial	Parallel
Working area	Wide	Narrow
Inverse kinematics	Difficult	Simple
Kinematics	Simple	Difficult
Position error	Accumulation	Mean
Stiffness	Low	High
Output power	Low	High

Figure 4: DOF Configuration of WL-15

軽量化を図りつつ機構剛性を向上させることが可能であり、可搬重量の増加や歩行速度の向上が容易となることが考えられた。

これらのことから、本研究ではパラレルメカニズムを脚機構として採用し、先に述べた機能的要求を満足しようとした。

1-2 機構設計 パラレルメカニズムを用いた脚機構の特性はその機構形式・寸法に大きく依存するため、適切な形式・寸法を決定することは重要である。WL-15 は一つの能動直進対偶と2つの受動球対偶で構成されるスチュワートプラットフォームをベースに設計した。この機構の特徴としては：

- ・ 2つの球対偶間のリンクには曲げモーメントが作用しないため軽量のリンクで大きなリンク剛性が得られる。
- ・ アクチュエータを腰部近くに配置することが可能で、可動部の不要な質量増大が回避される。これはアクチュエータの出力を多く必要としないと同時に、歩行時の被補償モーメントが小さくてすむことも重要である。

などの利点がある。

自由度配置図を図4に示す。

各部品の詳細な設計に関しては紙面の都合で省略するが、構造材料に関しては、機構自体の剛性が高いことを見込んで各リンクの剛性を低下させても軽量化を図り、ポリアセタール樹脂を多くの部品に用いた。また各直動アクチュエータには不動作電磁ブレーキを組み込み、電源を落とした状態でも姿勢の保持を可能としている。

3. 歩行制御

著者らのグループでは、2足歩行ロボットに対して力学的視点から安定性を判定するために、ZMP 安定判別規範を用いてきた⁽²⁻⁵⁾。ZMP とは路面上において2足歩行ロボットの各部の重力および慣性力によるモーメントがゼロになる点であり、運動中のあらゆる瞬間において、ZMP が支持多角形内に存在し、かつ2足歩行ロボットから路面に作用する力が路面を押す向きであれば、2足歩行ロボットは安定して運動を継続できる。これを ZMP 安定判別規範とよぶ。

著者らのグループが 1992 年に開発した歩行制御手法^(3, 4)では、任意の足先軌道により生じるモーメントを体幹部と腰部の動作により補償し、歩行を安定化するという方法を採用してきた。このアルゴリズムは、汎用2足ロコモータの歩行制御においても活用することが可能であることが分かっている。詳細については文献⁽⁶⁾を参照されたい。

本アルゴリズムは以下の4点からなる。

- I 2足歩行ロボットのモデル化
- II I のモデルにおける ZMP 方程式の導出
- III 2足歩行ロボット近似モデル化

IV IIIの近似モデルを用いた繰り返し計算によるIIを満足するモーメント補償軌道の厳密解の算出

図5のように、絶対座標系をO-XYZ、腰部付近に固定された運動座標系を $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ と設定する。次に絶対座標系から表したZMP方程式を満たすような腰部および体幹部の軌道を求める。本アルゴリズムではモーメント補償軌道の近似解の算出とその厳密モデルへの代入、そしてモーメント誤差をフィードバック、蓄積する繰り返し計算によりモーメント補償軌道の厳密解を得ている。モーメント補償軌道算出アルゴリズムのフローチャートを図6に示す。

O-XYZ: fixed coordinate system

W-XYZ: moving coordinate system

Figure 5: Coordinate Frames

Figure 6: Computation of Waist Motion

Figure 7: Dimensional Outline of WL-15

Table 2: Specifications of WL-15

Model No.	WL-15
Dimension / Weight	
Height	1200 mm
Weight	57 kg
Mechanism	
Link Mechanism	Stewart Platform
Degrees of Freedom	6 x 2

4. 実験

4-1 開発した WL-15 の仕様 本研究で開発した、脚機構に平行メカニズムを用いた汎用 2 足ロコモータの試作機 WL-15 の外形寸法図を図 7 に、仕様を表 2 に示す。

4-2 歩行実験 WL-15 の歩行性能を評価するため、様々な歩行実験を行った。

実験を行った結果、以下のような結果を得た。

- ・ 最大歩幅 200 mm
 - ・ 最小歩行周期 0.80 s/step
 - ・ 最大旋回角度 90 deg
 - ・ 最大積載重量 18 kg
- 歩幅 200 mm での前方歩行、側方歩行、高速方向転換、屋外での歩行実験の映像をそれぞれ図 8~11 に示す。

5. その他の研究成果

前章で述べた実験結果を踏まえ、著者らは 2002 年に、WL-15 の問題点であったジョイントのバックラッシュや可動範囲の狭さ、積載可能重量の不足などを改良した WL-16 を開発し、これまでに、仮想コンプライアンス制御を用いた不整地での歩行 (図 12)、50kg の重量物積載歩行 (図 13)、歩幅 300 mm での歩行などを実現した⁽⁹⁻¹¹⁾。

Figure 8: Walking with 200 mm Step Length (Forward)

Figure 9: Walking with 200 mm Step Length (Side)

Figure 10: 90 deg Turn in 2 Steps

Figure 11: Outside Walking

6. 結論

「汎用 2 足移動モジュール」という概念を提案し、これに基づき、パラレルメカニズムで構成された脚と腰部のみで構成された汎用 2 足ロコモータの試作機 WL-15 および WL-16 を開発した。設計においては、パラレルメカニズムの機構剛性の高さを最大限に生かし、構造部材には樹脂を多用することで軽量化を図った。開発した WL-15, WL-16 を用いて、動歩行はもとより高速方向転換、屋外での歩行、重量物積載歩行などに成功した。

今後も引き続き汎用移動機構モジュールとして実用に足る 2 足ロコモータの開発を続けてゆく予定である。

謝辞

本研究は早稲田大学ヒューマノイド研究所のもとで、株式会社テムザックの出資を受けて行われた。また、本研究で用いたバッテリーは三洋電機株式会社ソフトエナジーカンパニーにより提供された。両社および 3 次元 CAD ソフトウェアをご提供いただいたソリッドワークス・ジャパン株式会社、球面軸受を製作していただいたヒーハイト精工株式会社に感謝致します。

Figure 12: Walking on Uneven Surface using Virtual Compliance Control (WL-16)

Figure 13: Walking with 50 kg Load (WL-16)

文献

- (1) <http://www.independencenow.com/ibot/index.html>
- (2) 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, 3-4 (1985), 67-78.
- (3) 高西, “上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット,” 日本ロボット学会誌, 11-3 (1993), 348-353.
- (4) 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, 11-4 (1993), 581-586.
- (5) 山口他, “2 足歩行型ヒューマノイドにおける全身協調型 2 足動歩行制御,” 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1997), 851-852.
- (6) Y. Sugahara, et al., “Design of a Battery-powered Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism,” Proc. of the 2002 IEEE/RSJ IROS (2002), 2658-2663.
- (7) 菅原他, “汎用 2 足ロコモータの開発,” 第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集 (2003), 154-159.
- (8) Y. Sugahara, et al., “Control and Experiments of a Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism,” Proc. of the IEEE ICRA (2003).
- (9) 菅原他, “脚部にパラレルリンク機構を用いた 2 足ロコモータの開発 (第 3 報: 仮想コンプライアンス制御を用いた不整地歩行),” 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2003).
- (10) 菅原他, “脚部にパラレルリンク機構を用いた 2 足ロコモータの開発 (第 4 報: 高可搬重量化、広可動範囲化を図った新型ハードウェア),” 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2003).
- (11) Y. Sugahara, et al., “Realization of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control,” Proc. of the IEEE/RSJ IROS (2003).