動作自由度数を低減した脚車輪型移動ロボットの 駆動機構と歩行および走行の双方向切り換え制御

岡田 徳次^{*1} ボテリョ 田中 ヴァーグナ^{*2} 清水 年美^{*2}

Driving Mechanism of a Legged and Wheeled Mobile Robot with Minimal DOFs and Control for Reversible Switching between Walking and Rolling

Tokuji Okada^{*1}, Wagner Tanaka Botelho^{*2} and Toshimi Shimizu^{*2}

This paper proposes a design concept for renovating a legged robot to a hybrid mobile robot with minimal degrees of freedom (4DOFs) and its motion analysis for switching locomotion from leg-type to wheel-type and vice versa. For the leg-type locomotion, specifically in the transitional state of sitting or standing, we show the control method based on minimization of total energy cost considering the distribution of a motor power payload in hip and knee joints using a motor specification. Also, we discuss robot configurations for switching between the two types under such environmental factors like walking gaits, ground inclination angle and traveling direction. Knee joint position of a pivotal foot determines knee ahead and knee behind gaits. Then we find three beneficial switching types aiming for moderate use of motor, rider's comfort, and energy saving. Moreover, we clarify the control method for changing traveling direction within a switching period. Finally, we demonstrate the switching and verify that the results of the analysis become useful for enabling the switch on demand. Also, the demonstration verifies that the robot can generate a steering function while it switches between the two types of locomotion.

Key Words: Legged Robot, Wheeled Robot, Hybrid Robot, Mobility, Gait

1. はじめに

1 台の装置で脚型、車輪型のいずれにも兼用できる移動ロボットは、一般に二つに大別できる。一つは、脚先に車輪を備える車輪一体方式で、車輪の回転を拘束する場合脚として、また、拘束しない場合車輪として機能する。ほかの一つは、脚と車輪を個別に備える脚車輪分離方式で、両方を同時に使う場合も個別に使う場合もある。

前者の例を挙げると、新井らの装置は後部脚先に能動輪を、前部脚先に受動輪を備える [1]。Lawn らの車いすは、近傍のモータで駆動される能動輪を脚先に備える [2]。また、広瀬らの階段昇降ロボット Zero-carrier は、四つの支柱下に能動車輪を、ほかの四つの支柱下に受動車輪を備え、これら八つの支柱を協調的に上下させる [3]。

後者の脚車輪分離方式の例を挙げると、例えば、Krovi [4] や Tavolier [5] らの車いすがある。利用者が人の手、ステッキ、松葉杖などの助けを得て広範に移動することを考えればこの方式

の有効性は大きい。障害物に遭遇するときの車いすは、先に進めず窮地に陥る。その解決にはバリアフリー化が必要である。前記 Krovi らの車いすは、後部に二つの動輪を、前部に二つの受動キャスターのほかに 2 動作自由度の能動脚をそれぞれ備える。Lacagnia らのロボット Wheeleg は、前部に 3 動作自由度の伸縮関節をもつ脚を二つ、後部に独立に駆動可能な動輪を二つ備える [6]。Germann らのロボット Alduro は、車輪を後部に有するが前部には装備しない [7]。中野らの脚車輪ロボット ChariotII は、脚と車輪を分離する構造に属する [8]。Bourbakis らのロボット Kydonas は、先端に受動輪を付ける上下動可能な三つの脚と、車輪を付けずにハンドリング用の腕機能をもつ三つの脚を使って階段を昇降する [9]。車いすの車体に 4 脚を取り付けて車輪走行から脚歩行に切り換え可能にした Lin らの装置もある [10]。

このほか、一体でもなく分離でもない前記分類では整理しにくいロボットがある。本稿ではこれらを特殊移動ロボットとよぶことにする。遠藤らの Roller-Walker は運動の斬新さからこれに属すると考えられる [11]。これは、脚先に軸支された受動輪を半固定的に縦にして脚のスケート運動により車輪走行を、また、横にして通常の歩行を行う。Sonehara らの脚車輪ロボット IMR は、先端の二つの車輪に足首機能をもたせた 4 脚と車輪を有しない中央部の単純な脚の協調制御により歩行し、また、階

原稿受付 2010 年 1 月 19 日

^{*1}新潟大学工学部

^{*2}新潟大学大学院自然科学研究科

^{*1}Niigata University

^{*2}Graduate School of Niigata University

■ 本論文は提案性で評価されました。

段を昇降する [12]. Morales らの車いすは、脚に替わる板を階段の突端に渡し、いす本体をラックにより上下させて昇降を可能にする [13]. 筆者らのロボット PEOPLEP (Perpendicularity Oriented Planetary Legged Robot) 1 号機は、一定長の腕を股関節周りに連続回転させ、その先を膝関節とし、この関節から先の脚姿勢を制御することにより歩行を実現する [14]. クローラは牽引力の増大に有効な移動手段であり、路面が線状に変形した車輪型の 1 種と考えられるが、線状部分を立てて脚として使えるようにしたロボット (例えば文献 [15]) は特殊ロボットに分類できると考えられる.

以上のように移動ロボットは、運ぶ対象が物、人であっても脚型あるいは車輪型の利点を活かし、高速な演算制御技術やインターフェース技術に支えられて発展してきた. 整地、不整地を問わず、また、車いすにおいても車両として高速に移動する技術が強く要請されている状況から、歩行にも走行にも使えるハイブリッド型移動ロボットへの期待は大きい. しかし、まだ利便性の高いバリアフリーな移動ロボットが実現しているとはいえない. アッカーマンジオメトリを満たす車両には摩擦損失を小さくする高速移動のメリットがあり、多脚移動ロボットには不整地を安定に移動するメリットがある. いずれにも操舵用の複雑な機構や制御を必要とするデメリットがある. これに対し、これらのデメリットに影響されない手段として、車輪や脚の摩擦力や滑りを積極的に利用して操舵するスキッドステア移動ロボットがある (例えば文献 [16]). この種のロボットは、余分なエネルギー消費、タイヤの磨耗を作り出すが、構造を簡単にし、動力学モデルに依らない簡単な速度差制御で不整地移動のロバスト性を高めるメリットをもつ. 筆者らはこのメリットに着目し、搭乗者が人の手助けを求めず着座したまま機械要素などを付け外すことなく、また、衝撃力などを受けることなく脚型と車輪型の移動方式を必要に応じて切り換える技術を開発し、車いすのバリアフリー化に有効なハイブリッド歩行いすの設計や制御の指針を見いだした [17].

本稿は、歩行専用の脚型ロボット、あるいは走行専用の車輪型ロボットのそれぞれに本質的なデメリットによって移動性能を低下させないようにするため、換言すれば、両専用ロボットのメリットを活かせるよう一つのロボットを歩行にも走行にも使えるようにするため、操舵機構を必要としない少ない動作自由度数 4 の脚型ロボット (PEOPLEP-I) に環状枠を取り付けるだけで、これを走行ロボットとしても兼用可能なハイブリッド型移動ロボットに進化させる機構と制御について述べる. 特に、従来の歩行、あるいは走行に限った専用ロボットのデメリットに束縛されずに、また、搭乗者の単純な指令一つで歩行および走行の双方向切り換えをスムーズに行うための近位リンクと遠位リンク (以下、それぞれを単に腕、脚とよぶ) の協調制御アルゴリズムについて述べる. 移動方式の切り換えには、股関節の回転方向、車体の後戻りを含む上下動軌跡、所要エネルギーのいずれかを重視するかによって異なる制御アルゴリズムの存在を示す. 路面の傾斜角、昇降の別などに適応するロボット姿勢角を吟味し、前記 3 項目のそれぞれに適する切り換え制御を構築する [18]. さらに、移動方式の切り換えと同時に進行方向を変える制御を明らかにする. 後半では実際に、PEOPLEP-I を

Fig. 1 Outlook of the legged robot PEOPLEP-I

進化させた PEOPLEP-II を制御し、撮影した動画の時系列写真を使って提案する切り換え制御の有効性を実証する.

2. ハイブリッド型移動ロボットへの機能拡張

2.1 使用する記号とパラメータの説明

ロボットの各部と運動解析の理解を容易にする記号やパラメータを以下に列挙する. ただし、関係する図や式をそれぞれの末尾に括弧書きで記す.

- J : 関節 $\{J_h$; 股関節, J_k ; 膝関節 (J_{k1} と J_{k2} で 1 対) (Fig. 2)
- T : 駆動トルク (T_h ; J_h 用トルク, T_k ; J_k 用トルク) (Fig. 5)
- a_i : J_h と J_k 間の水平距離 (Fig. 11)
- b_i : J_h と脚先間の水平距離 (Fig. 11)
- θ : ロボット前方を基準とする腕姿勢角 (Figs. 4, 5)
- γ : 鉛直方向を基準とする脚姿勢角 (Figs. 4, 5)
- ℓ : 脚長 (Fig. 3)
- r : 腕長 (J_h と J_k 間の距離) (Fig. 3)
- R : 環状枠の外半径 (Fig. 3)
- H : J_h の路面上高さ (Fig. 6)
- h : 脚先で衝突回避可能な障害物の最大高さ (Fig. 13)
- c : J_k と J_h 用モータの減速比を含む定格出力容量比 (Eq. 6)
- θ_r : 水平前方を基準とする腕姿勢角 ($=\theta - \theta_s$) (Fig. 14)
- θ_a : 障害物への脚先衝突回避用、あるいは移動方式切り換え時の操舵角指定用の θ_r (Figs. 13, 14, 20)
- D_s : 歩行時の一遊脚先から路面に至る最短距離 (Fig. 14)
- D_u : 走行時の二遊脚先から路面に至る最短距離の長い方
- D_l : 同上最短距離中の短い方、すなわち、 $D_l < D_u$ (Fig. 14)
- θ_s : 路面傾斜角 (Fig. 14)

2.2 多重軸股関節をもつ脚型ロボット

J_h の周りに J_k を公転させて歩進と蹴上げを実現する移動ロボット PEOPLEP-I を Fig. 1 に示す. その駆動機構の設計は左右で同じである. 以下、 J_h と J_k を結ぶリンクを腕、 J_k から伸びる棒を脚とよぶ. J_h と J_k は左右で独立に運動するが、前後は機械的に結合されるチェーンにより同期し、腕同士を、また、脚同士を同じ姿勢角にする. Fig. 2 中の M_1 は右側前後 J_k の駆動用モータを、また、 M_4 は右側前後 J_h の駆動用モータを意味し、 γ と θ をそれぞれ変える. M_2 と M_3 は、左側前後の J_k 用と J_h 用モータとしてそれぞれ同様な役割を果たす. このロボットを歩行させる制御則として数種の周期関数が用意さ

Fig. 2 Sketches of the hybrid robot illustrating wheel assembly in (a) and its use for rolling in (b)

Fig. 3 Force transmission mechanism connects the motors with J_h and J_k by means of chains and sprockets

れ、搭乗者は必要な制御アルゴリズムを選択的に実行することで歩幅を変えるだけでなく操舵やその場旋回を可能にする[14].

2.3 膝関節を束ねる車輪用の環状枠

脚型専用の移動ロボットは、高速に移動できない特質をもつ、この難点を解決するため、脚型専用ロボットである PEOPLEP-I を実験機とし、この腕に車輪として使える環状枠を取り付けて固定することにした。Fig. 2 は、その組み立て状況を説明する。すなわち、四つのモータの配置や使い方を変えることなく、(a) の脚型を (b) のハイブリッド型に進化させる。Fig. 3 は、 M_1 と M_4 の動力を右側の J_k と J_h にそれぞれ伝達する経路をロボットの上面と側面から見て説明する。Fig. 4 は、車体側から J_h と J_k に駆動力を伝達するために必要なスプロケットなどの機械要素を組込む車輪内部構造を示す。一つの J_h 軸上に別の軸

Fig. 4 Magnified explanation of the leg driving mechanism

Fig. 5 Renovated mechanism of the PEOPLEP-II

を重ねる多重軸構造により1対の脚が互いに逆向きの角度 γ に開閉するのが分かる。この理解には、説明のために記した Fig. 3 中の B-B と C-C の断面において M_1 の回転軸に直結するスプロケットに噛み合うチェーンが一方で上に他方で下にあることに注意が必要である。Fig. 5 は、前記環状枠を固定してハイブリッド化したロボットのスケッチである。

歩行の用途には、 $r < R$ で J_k は環状枠内にあり、 θ のいかにに依らず車輪を着地させてはならない、それには $R < l$ でなければならない。また、脚を段違いのクランク形にして $2r < l$ とすることも考えられるが、駆動トルクの増大を招くため長さに限度がある。特に、 J_k との脚先衝突回避には $l < 2r$ を満たす必要がある。これらの理由から、本稿は次の条件下で考える。

$$r < R < l < 2r \quad (1)$$

これにより H は次の範囲で変化する。

$$R \leq H \leq r + l \quad (2)$$

環状枠の半径は以上を満たす必要があるが、その幅については特に制限はない。このため、枠内に三つのチェーン経路を配設するスペースの確保に問題はない。ただし、幅広の枠は走行中のグリップ力を高めるが、操舵時の摩擦力を増やすので注意が必要である。

要するに、前記の条件や機構の採用により1対の脚を逆向きに揺動させ、かつ、前後の脚をチェーンで連結させて右側と左側の2対の脚をそれぞれ1個のモータで制御し、環状枠内へのアクチュエータやセンサの組み込みを不要にすることでロボット全体の動作自由度数を4に抑える。

Fig. 6 Series of walking motion with $\gamma=10^\circ$

Fig. 7 Untrodden area for stepping over obstacles while the legged and hybrid robot walks in (a) and (b), respectively

なお、脚ロボットが環状枠を固定すると、跨ぎ越え能力を低下させる反面、移動を安定にする。脚の踏み外し時の安全性を高めるだけでなく、段差昇降時のロバスト性を高めることが期待できるからである。この二面性については次節で考察する。

2.4 跨ぎ越え可能な領域

1 対の脚先を地面に向けて開き、あるいは閉じて歩く場合をそれぞれ大股と小股の歩行と定める。また、1 対の脚を常時鉛直に着地させる場合（すなわち、 $\gamma = 0$ ）を標準歩行と定める。 γ をゼロ以外の値に固定する最も簡単な制御則によれば歩行動作は Fig. 6 中の (1) $\longleftrightarrow$ (13) のように遷移する。この歩行は、 J_h の 1 回転期間内で大股と小股を繰り返す、 γ の固定値に依らず標準歩行時歩幅と同じ距離を進むのが分かる。(1) の大股時と (7) の小股時を比較し、跨ぎ越え可能な障害物の長さや高さは、歩幅や脚の制御則の違いによって異なるのが分かる。すなわち、平地面における一步当たりの跨ぎ越え可能な領域は Fig. 7 に表される。ただし、(a) は従来の脚型、(b) はハイブリッド型に関し、また、 A_1 、 A_2 、 A_3 は、大股、標準、小股歩行時の領域をそれぞれ示す [14]。以上から、環状枠を固定することにより跨ぎ越え可能な高さは減少するのが分かる。

しかし、歩行時でも環状枠を外さずに付けておくことが段差昇降時において不測の脚踏み外しに対する安全性の向上に役立つ。このような効果は様々な場面で起こり一概にはいえないが、Fig. 8 の a1 $\rightarrow$ a3 と b1 $\rightarrow$ b3 の 2 例から理解できる。ただし、図は一つの J_h に限定した説明であり、ほかの三つの J_h についても同様に説明できる。特に、階段昇降時には Fig. 9 の昇降例から環状枠が脚着地を補助し、踏み面状況に影響され難い着地を実現しやすくと考えられる。

以上の考察から、ハイブリッド型移動ロボットは、平地における跨ぎ越え能力を低下させるが、跨がずに乗り上げて踏破する方法もあるためそのことが大きな問題になることはない。そ

Fig. 8 Effect of the wheel for keeping safety in unexpected falling down while climbing up in (a) and climbing down in (b), respectively. Triangles point pivotal feet

Fig. 9 Effect of the wheel for leg landing in climbing a stairs up and down

れどころか、環状枠によって荷重を低位置で支持し、脚の踏み外しに対する安全性を高めるだけでなく、段差や階段の踏み面への脚の乗り上げや降下を助け、歩行のロバスト性を高めることになる。このような効果により、固定する環状枠の有用性は大きいと考えられる。

3. 移動方式切り換えのための関節協調制御

3.1 ロボット姿勢を定める歩容

着地脚の様々な形や順番などが文献 [19] に報告されている。PEOPLER-I に跳躍力はないため本稿は、静歩行時の軸脚（じくあし）を構成する J_k の位置が J_h に先行するか後行するかの違いに着目し、それぞれを膝先行歩容 KAG (Knee Ahead Gait) と膝後行歩容 KBG (Knee Back Gait) とよんで区別する。これらは、山側に上がる、あるいは谷側に下りるための転倒しにくい歩行の実現に重要なかわりをもつ。走行中の脚は無用であるが、上記歩容の定義は形式的に有効とする。

3.2 座り込み・立ち上り時のロボット姿勢角の決定

歩行から走行へ、あるいは走行から歩行への切り換え動作をそれぞれ座り込み、立ち上りとよぶ。両動作は可逆的で上下運動の方向に意味があり、歩行時の J_h は小股時に軸脚位置に近づき、大股時に軸脚位置から離れるのが Fig. 6 から分かる。切り換えは、軸脚を終始同じにして座り込み、あるいは立ち上りを完了させる制御であり、その制御には満足させる内容がいくつか考えられる。動的乗り心地や昇降時間はその一例である。上下動の軌道が指定される場合には腕や脚の姿勢角は一意に定まる。

しかし、上下動軌道の設計は一般に容易でない。動的乗り心地をよくするには切り換え時点の車高や車速、加速度を反映させる難しさが理由にある。そこで本稿は、省エネ効果、 J_h 制御の容

Fig. 10 Vertical motion characteristics in sitting/standing generated by the four methodologies

易さ、軌道の直線性、 J_k 制御の容易さを内容として軌道の設計を行う。個々の内容を重視する座り込み動作の遷移は、Fig. 10で表される [18]。左から順に、方法 (1)：自立のための J_h と J_k のトルク和を最小にする、方法 (2)：腕の姿勢角を固定する、方法 (3)：車体の上下動を直線軌道に指定する、方法 (4)：脚の姿勢角を固定する、と定める。記号 Δ は軸脚位置を示す。

省エネ効果を目指すには立脚時の静的所要エネルギーを小さく抑える必要がある。このためには J_h と J_k のトルク和を低減する姿勢角 θ_r と γ の算出が重要になる。しかし、そのような θ_r と γ は、 J_h を同じ高さ H に保つ場合でも複数存在する。このことを、Fig. 11 を使って説明する。ただし、図は $c=1$ の場合を示す。実際に、車軸荷重 W を支える姿勢角 θ_r と γ として、(a) は式 (3) を満たす二つの立脚姿勢 I と II を、また、(b) は式 (4) を満たす立脚姿勢 I, II, III を示す。

$$a_2 = a_1 + 2b_1 \quad (3)$$

$$\frac{b_1}{a_1 - b_1} = \frac{b_2}{a_2 - b_2} = \frac{b_3}{a_3 - b_3} \quad (4)$$

立脚維持に必要なトルクは、(a) の I において $T_h = b_1 W$, $T_k = (a_1 + b_1)W$ 、また、II において $T_h = b_2 W$, $T_k = (a_2 - b_2)W$ となり、上記条件の下では T_h と T_k の和は I と II で等しい。同様に (b) の I, II, III のどの姿勢であっても上記条件の下では T_h と T_k の和は同じとなる。したがって、省エネの観点からはこれらの間に違いはない。

しかし、腕や脚の駆動用モータには定格の出力容量が仕様として指定され、所要トルクがモータの負荷として軽いか重いかは異なる。モータの稼働率に凸凹がある場合には、過大な負荷を担うモータは発熱による出力低下を起こしかねない。このため、使うモータの稼働率を同程度、すなわち、定格出力容量に応じた電力を配分（消費）するのがよい。

以上の考察から、Fig. 10 中の方法 (1) のトルク和最小法に c を適用して算出される候補の中から θ_r と γ を吟味することに意味がある。具体的に、 T_h , T_k , H は次式で表される。

$$T_h = W(r \cos \theta_r - l \sin \gamma) \quad (5)$$

$$T_k = Wl \sin \gamma \quad (6)$$

$$H = r \sin \theta_r + l \cos \gamma \quad (7)$$

回転方向に依らない消費エネルギー関数としてトルクの 2 乗和

Fig. 11 A variety of configurations to make the robot stand at the body height H

E を考えると

$$E = (T_h)^2 + (c T_k)^2 \quad (8)$$

これを小さくするため $\partial E / \partial \theta_r = 0$ の条件を適用すると、未知数 $\sin \theta_r$ に関する 6 次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \theta_r} = & r^4(A^2 + 2A - 3) \sin^6 \theta_r - 2Hr^3(2A^2 + 3A - 5) \\ & \times \sin^5 \theta_r + r^2\{6H^2(A^2 + A - 2) - (r^2 + l^2)(A^2 + 2A - 3)\} \sin^4 \theta_r \\ & - 2Hr\{H^2(2A^2 + A - 3) - r^2(2A^2 + 3A - 4) - l^2(A^2 + A - 3)\} \sin^3 \theta_r \\ & + [H^2\{H^2(A^2 - 1) - r^2(6A^2 + 6A - 7) - l^2(A^2 - 2)\} - r^2\{r^2 - l^2(A^2 + 2A - 1)\} - l^4] \sin^2 \theta_r \\ & + 2Hr\{H^2(2A^2 + A - 1) + r^2 - l^2(A^2 + A - 1)\} \sin \theta_r - H^2\{(H^2 - l^2)A^2 + r^2\} \\ = & 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $A = c^2 + 1$ である。 $\sin \theta_r$ の値には範囲や連続性があり上式で計算される値の推移を調べることで $\sin \theta_r$ が決まり、その後 θ_r が定まる。これは、同構造のロボットでも各関節を駆動するモータの仕様がかわれば θ_r の解が変わり、立脚時の姿勢角 θ_r , γ も変わることを示す。詳しくは文献 [17] を参照されたい。

移動方式を切り換える瞬間には脚も車輪も同時に着地する。このときのロボット姿勢を以後、切り換え時姿勢 CRC (Change Round Configuration) とよぶ。一つの J_h に着目して平地上の CRC を横から見ると Fig. 12 となる。座り込み直前と立ち上り直後において、1 対の脚の一方が軸脚で他方は遊脚でなければならない。荷重支えに必要なトルクの低減には J_h と J_k の間の下方に軸脚を着地させるのがよい。これに該当する姿勢角は図中の (a) と (b) になる。しかし、(a) は、ここに至る過程で脚先のスティックスリップ現象を起こしスムーズな切り換えを困難にする。事実、 J_h を鉛直上下に制御してロボットを座り込ませ、あるいは立ち上らせる際にこの分のエネルギーを浪費する。また、1 対の脚は逆方向に連動する機構であるため、座り込み後半や立ち上り前半に消費エネルギー E を最小にするにも無理がある。すなわち、Fig. 13 中の (c), (d) において一方の脚は左側太線のように地中に埋まる。これを回避するには脚の連動

Fig. 12 Possible configurations of the robot sprawl

Fig. 13 Leg control for obstacle avoidance in a swing phase and the transition for sitting from (a) to (d)

を解除し遊脚を同図中の点線の姿勢にしなければならない。

しかし、両脚は互いに逆向きに運動する機構に依るためそうはできない。そこで、同図中左の (a), (b), (c), (d) のような姿勢変化においては、高さ h 以下の領域に遊脚先を降下させない制御を考える。実際に、(b), (c), (d) の左側姿勢を無効、遊脚先を高さ h の線上に保つ右側姿勢を有効とする。そのための θ_r を θ_a として定める。かつ、脚先を h の線上に位置づける γ を定めることで斜面上における姿勢角 θ_a と γ を実現する。これらは、以下の式から算出される。

$$\theta_a = \sin^{-1} \left\{ \frac{R}{r} - \frac{(2R-h) \cos \theta_s - U}{2r \cos \theta_s} \right\} - \theta_s \quad (10)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \{ (H - r \sin \theta_a) / l \} \quad (11)$$

ただし、

$$U = \sin \theta_s \sqrt{4l^2 \cos^2 \theta_s - (2R-h)^2} \quad (12)$$

θ_a は、歩行の制御則に従って移動する遊脚に関し、 $D_s < h$ となる場合に立脚の θ_r として適用される (Fig. 14 参照)。このため、ロボットは、歩行中の D_s を知る必要がある。また、車輪転動中には $D_u < h$ 、 $D_l < h$ となる場合の脚先を h 以上に制御するため、 D_l や D_u の値を知ることも必要である。それ

 Fig. 14 Explanation of D_s , D_u , and D_l

Switch	Environment	Gait	Methodology
1) Le to Wh	1) Ascend	1) KAG	1) Mini torque
2) Wh to Le	2) Descend	2) KBG	2) Const. θ_r

Fig. 15 Conditional combinations for activating locomotion control

ぞれの計算式は以下で与えられる。

$$D_s = 2\{r \sin(\theta_r + \theta_s) - l \sin \gamma \sin \theta_s\} \quad (13)$$

$$D_u = R + r \sin(\theta_r + \theta_s) - l \cos(\gamma - \theta_s) \quad (14)$$

$$D_l = R - r \sin(\theta_r + \theta_s) - l \cos(\gamma + \theta_s) \quad (15)$$

4. 切り換え制御アルゴリズム

4.1 切り換え環境

切り換え時期は搭乗者によって指令され、移動中でも要求された後の早い時点で実行に移せるのが望ましい。このため、受け付け時の移動環境やロボットの動作状態はスムーズな切り換えに強く影響する。本稿は、これらを切り換え内容、路面傾斜、採用する歩容、姿勢角 θ_r と γ の決定法、の違いによる組み合わせとして表し、Fig. 15 に示す 16 種類 ($=2^4$) について取り上げる。ただし、Le は脚型、Wh は車輪型を表す。例えば、Le から Wh への切り換えを降坂路上で KAG の歩容を形成し、かつ、腕姿勢角 θ_r を固定する制御で実現する場合を、図中の識別子 1 と 2 を組み合わせた 4 桁の配列 1212 で表す。これを Switch, Environment, Gait, Methodology の頭文字に関連づけた切り換え環境宣言配列 Segm と定義する。ただし、 $\theta_s=0$ を特別に取り上げる場合の上位 2 桁目の識別子としてゼロも可とする。

4.2 操舵なしの切り換え制御シミュレーション

16 種類の切り換え環境におけるロボット動作を計算機で模擬し、可視化した経時遷移を確認した。Fig. 16 は Segm=1111 における結果を示す。ただし、 $\theta_s=10^\circ$ である。CRC は図中の姿勢 9) に現われる。後半では腕の回転が前半の CCW から CW

Fig. 16 Configuration series in the switching mode of Segm=1111

Fig. 17 Rider's view of the swing phased leg postures

に逆転するのが分かる。走行中に退避させる1対の遊脚姿勢は自由であり、 J_h を一点に集めて脚姿勢を描いたFig. 17(a)のように常時上方を向いても、あるいは(b)のようにある範囲内で特別な向きにあってもよい。実際に、(a)では $\gamma = \pm\pi$ [rad], (b)では (θ_r, γ) の組として $(0, \pi/18)$, $(\pi/4, \pi/4)$, $(\pi/2, \pi/2)$, $(3\pi/2, 3\pi/2)$, (π, π) を指定し、最小2乗法により γ を θ_r の周期関数として定めた。その結果は次となる。

$$\begin{aligned} \gamma = & 3.15 + 0.38 \sin \theta_r - 0.23 \sin(3\theta_r) + 1.03 \cos \theta_r \\ & + 0.0079 \cos(2\theta_r) + 0.38 \cos(3\theta_r) + 0.0079 \cos(4\theta_r) \end{aligned} \quad (16)$$

次に、車体中心Gの移動軌跡を取り上げる。これは、Fig. 16の切り換えを例にするとFig. 18(a)となる。すなわち、図中の番号1の終点で切り換えを開始し、曲線部2, 3を経て定常の走行軌道4に移行する。同図中の軌跡には双方向性があり、逆方向の移動も可である。すなわち、Segm=1111で明らかになった内容はSegm=2221でも同様となる。一般に、4桁目の値が同じとき1~3桁目を別の値に置換した配列は、置換前とは真逆の切り換えを意味する。例えば、図中(a)右のSegm=2111における移動軌跡4→7を逆に辿る軌跡7→4は、同図(d)中左のSegm=1221における移動軌跡1→4に同じとなる。(b)中の左右はSegm=1211, 2211, (c)中の左右は1121, 2121, (d)中の左右は1221, 2221, の結果をそれぞれ表す。また、姿勢角決

Table 1 Betterment among switching modes

Switch (type)	Environment	Gait	Methodo.	Segm	One way rotation	Ride comfort	Energy Consump.
From leg to wheel	Ascending	KAG	Min. torq.	1111	×	○	○
			Const. 0r	1112	—	⊗	○
		KBG	Min. torq.	1121	⊗	×	○
			Const. 0r	1122	—	×	○
	Descending	KAG	Min. torq.	1211	×	○	⊗
			Const. 0r	1212	—	⊗	○
		KBG	Min. torq.	1221	⊗	×	○
			Const. 0r	1222	—	×	○
From wheel to leg	Ascending	KAG	Min. torq.	2111	⊗	×	○
			Const. 0r	2112	—	×	○
		KBG	Min. torq.	2121	×	○	⊗
			Const. 0r	2122	—	⊗	×
	Descending	KAG	Min. torq.	2211	⊗	×	⊗
			Const. 0r	2212	—	×	○
		KBG	Min. torq.	2221	×	○	○
			Const. 0r	2222	—	⊗	○

定法(2)による同様な切り換えはFig. 19の結果となる。ただし、(a)の左右は1112, 2112, (b)の左右は1212, 2212, (c)の左右は1122, 2122, (d)の左右は1222, 2222の各場合を示す。

Segmの値を変えたほかの切り換え制御についてもロボット動作を計算機で模擬し、Fig. 16と同様な遷移図として可視化した。その詳細は省略する。得られた結果を、1) J_h 軸回転方向の不変性、2) 乗り心地を支配する後退なしの移動、3) 座り込みや立ち上りに必要な静的エネルギー和の低減、の各項目について比較評価すると、Table 1の結果となる。ただし、静的エネルギー和とは、速度や加速度を無視し、ある範囲内の高さを細分割したそれぞれの高さにおいて立脚姿勢の維持に必要な消費エネルギーEの和を意味する。図中の記号⊗, ○, ×は、ほかとの相対比較において十分満足, 妥当, 不満足に分類する。その結果は、項目1)においてSegm=1121, 1221, 2111, 2211が、2)において1112, 1212, 2122, 2222が、3)において1121, 1211, 2121, 2211がそれぞれ優れることを示す。ただし、項目1)に関する横線の記載は θ_r を固定する理由から評価不能を示す。このような結果から3項目をすべて優位にする制御は見いだせず、搭乗者の要求に応じて制御法を選択せざるを得ないことが分かった。

4.3 操舵ありの切り換え制御シミュレーション

直前後方向への進行中に移動方式を切り換える制御についてこれまで述べた。しかし、小幅な方向転換であれば切り換えと同時に操舵も可能になる。具体的に、脚型移動時に車体のローリングを回避する目的で左右の θ_r と γ を同じ値に制御するが、車輪型への変更指令を受け付けた時点から、軸脚位置を保持して左右の θ_r と γ を変更し左右車輪の前方着地位置をずらす。このことは、Fig. 20中左の(a)を参照すれば明らかである。すなわち、切り換えの要求の発生時点で θ_r を左右で異なる θ_{a1} (左)と θ_{a2} (右)に制御して座り込み、あるいは立ち上がることで車体左右の次への移動位置に d_1 (上図)と d_2 (下図)の違いをつける。その結果、車体はその差 $d_1 - d_2$ の符号の違いを利用して左、あるいは右に方向転換する。大差の場合操舵角も大になるが、脚の駆動トルクに限度があるため通常は小さな方向転換になる。

さらに、その場旋回動作時の座り込み、あるいは立ち上がり運動を利用して切り換え時の操舵を達成できる。Fig. 20中右の(b)は、この場合の操舵角生成の原理を説明する。すなわち、 $\theta_{a2} \approx \pi - \theta_{a1}$ として左右の股関節を逆転させることで座り込

Fig. 18 Trajectory of the robot center G calculated using the methodology-1 with $\theta_s=10^\circ$

Fig. 19 Trajectory of the robot center G calculated using the methodology-2 with $\theta_s=10^\circ$

Fig. 20 Appropriate use of θ_a in right and left generates a steering function while switching

み時の車輪着地距離に、あるいは、立ち上がり時の脚着地距離に、違いをつける。その結果、 θ_{a1} の大きさに応じた操舵が可能となる。座り込み後、あるいは立ち上がり後の前後進に移る

には左右の J_h を同方向の駆動に戻すことが必要である。

5. 移動と切り換えの実験

5.1 ハイブリッド型移動ロボット PEOPLER-II の概要

実験機の脚型ロボットをハイブリッド型に進化させた PEOPLER-II の外観を Fig. 21 に示す。後部に搭載したノート型 PC は、ロボットの移動や切り換え制御に必要な装置である。このスロットにはインターフェース用として 2 枚のデジタル/アナログ入出力 PC カード ADA16-32/2(CB)F (CONTEC) が挿される。1 枚は脚制御用、ほかの 1 枚は腕制御用である。ロボットの制御プログラムは JAVA 言語で書かれ、インターフェース用の BASIC++ とは双方向のデータ転送を可能にする。そのほかの仕様は Table 2 に示される。搭乗者はダミーである。

5.2 移動の基本動作

ロボットは、搭乗者の要求に応じて実行するプログラムを選択し、歩行、あるいは走行のいずれにおいても前後進、左右前後操舵、その場旋回、を可能にする。しかも、搭載する傾斜セ

Fig. 21 Prototype of the hybrid robot, PEOPLER-II

Table 2 Specifications of the PEOPLER-II

Items	Details
Body	$L_h=110$ [cm], $L_w=90$ [cm] $W_t=107$ [kg]
Arm	$r=16$ [cm]
Leg	$l=30$ [cm] (prismatic rectangular form) (wooden soles are exchangeable for casters)
Wheel	Connection of two circular rings of 1 [cm] thickness with 6 [cm] gap for $R=20.7$ [cm]. Each ring is made of 4 circular pieces.
Motor	Kyoei-SS60E3(120 [W]) with gear ratio 1/180 for 29 [Nm] (2 for J_h and 2 for J_k).
Sensor	Two-axis inclinometer AccuStar SD-20
Controller	4 Servo Controller VP100 by NEC-PC-LaVie (Each axis for detecting pitch and roll)
Interface	PCI cards of ADA16-32/2(CB)F (CONTEC)
Payload	5 [kg]
Max. h	9.25 [cm]
Battery	12 [V]-62 [Ah]
Max.Speed	1.2 [km/h](L-type), 2 [km/h](W-type)

ンサの出力を用いて路面斜角を検知し、重力方向を考慮した着地姿勢を定めて斜面上の歩行に対応する。歩行時に避け難い J_h の周期的な上下動を除けばこれらの基本動作は、ピッチ、ヨー、ロールなどの振動を起こさずスムーズであることを確認した。ここでは、そのいくつかを動画から切り取った時系列の画像で示す。実際に、Fig. 22 に操舵歩行 (a1→a4)、操舵走行 (b1→b4)、脚型その場旋回 (c1→c4) を示す。ただし、操舵走行時の遊脚制御に Fig. 17 (a) を採用した。いずれにおいてもスムーズな運動であることを動画で確認した。

5.3 操舵なしの切り換え制御

Table 1 に示した 16 種の異なる状況下で移動方式を一方から他方に切り換える実験を行った。この切り換えは一般に、車輪型から脚型に切り換える制御、すなわち立ち上り、において実現困難になる。座り込みに比べて車体重量のを持ち上げに必要なポテンシャルエネルギーを余分に供給しなければならないことが理由である。特に、斜面を上昇中に切り換えることは一層困難になる。実験では、 $\theta_s=0^\circ$ の平床面に加え、2 枚の長板を傾けた $\theta_s=7^\circ$ の登坂路上で一方から他方に切り換えることを取り上げた。Fig. 23 中の (a), (b), (c) はこれらの結果を示す。ただし、それぞれの切り換え状況を示す Segm は、2012, 2112, 1112 であ

Fig. 22 Fundamental demonstration of the hybrid robot for the turn in L_e and W_h in (a) and (b), respectively. Spin in L_e is in (c)

る。いずれの結果もヨー、ロール、ピッチ、滑り、振動などを示さないことからスムーズな切り換えを実現していると判断できる。

Fig. 24 は、Methodology の異なる切り換え制御に関し、車体中心に LED を置き、夜間の実験で輝点の移動を追跡した写真を示す。軌道 (a) と (b) を Figs. 18, 19 に示した $\theta_s=10.0^\circ$ のシミュレーション結果と比較するのは θ_s が違うため妥当でないが、Fig. 18 (a) 中左と Fig. 19 (a) 中左の軌跡形状に似た傾向があるのが認められる。

5.4 操舵ありの切り換え制御

移動方式の切り換え時、すなわち CRC の状態において、左右の脚、あるいは車輪の着地状態を変えることでわずかであるが切り換えと同時に進行方向を変えられる。これを確認するため、平床面において $\theta_{a1}=5.0^\circ$, $\theta_{a2}=20.2^\circ$ の場合を実験した。Fig. 25 はその結果の時系列画像を示す。ただし、(a) は前進中、(b) は後退中、(c) はその場左旋回中の操舵結果である。いずれにおいても進行方向が変わることを確認できる。なお、操舵角は (a) と (b) において $\theta_{a1}-\theta_{a2}$ に応じて増減するが、その定量的正確さの追求は、路面摩擦係数の影響を受けるので困難である。したがって、摩擦係数と差に応じた操舵角の目安を事前の実験によりデータベース化しておき、この関係を逆引きして左右の θ_a を設定するのがよいと考えられる。以上の実験結果から切り換え制御は、脚型、および車輪型の基本動作と同様、ピッチ、ヨー、ロールなどの振動を起こさずスムーズであることを確認した。

なお、実験機は重心位置制御用カウンターバランス機構を備えていないため、設計仕様に基づいて計算される転倒路面角が定まる。具体的に、 γ の値 20° , 0° , -20° のとき、それぞれ、 5° , 21° , 34° の転倒ピッチ角となる。また、転倒ロール角が γ に依らず 41.3° となる。このような特徴をもつロボットの切り換え制御に関するシミュレーションと実験結果が一致する θ_s の限界を調べることは、単純でないため叶わなかった。一般に、

Fig. 23 Straight forward switch from the top to bottom with the mode of 2012 in (a), 2112 in (b) and 1112 in (c)

Fig. 24 Experimental trajectory of the robot center G on the slope of $\theta_s=5.2^\circ$. Request is to switch from L_e to W_h while the robot ascends from left to right with the Segm of 1111 and 1112 in (a) and (b), respectively

θ_s の増大とともに、軸脚に作用する荷重は不均一となり、摩擦力は軸脚ごとに変わる。さらに、路面の不均一性の影響を強く受け、発生する滑りに因ってロボットは実験中に転倒することが予想される。このときの物損、および人的被害の回避対策は容易でないと考えられたことも究明を困難にした一因である。

6. お わ り に

脚型ロボットを車輪型ロボットとしても移動可能なハイブリッド型に進化させる方法と、特別な機械要素などの付け外しなしに実行するプログラムの切り換えのみで歩行と走行の移動方式を一方から他方に連続して切り換える制御法について明らかにした。

Fig. 25 Switches with a steering function. (a) switches to W_h while moving forward. (b) switches to L_e while moving backward. (c) switches to W_h while spinning

また、実際に進化させたロボット PEOPLEP-II を制御し、歩行と走行の双方向切り換えをスムーズに行えることを実証した。

具体的に、腕先に配設した J_k を J_h の周りに公転させ、かつ、多重化した J_h 軸を経由して J_k 周りに脚を揺動させる動力を伝達し、腕回転と脚揺動の協調により歩進と蹴り上げを同時に行う 4 動作自由度の脚型ロボットに対し、環状枠を固定するだけで脚型のみならず、車輪型としても機能するハイブリッド型移動ロボットに進化させることを可能にした。また、過渡的な座り込みと立ち上がりの安定した動作が重要なことを指摘し、ロボット姿勢角の決定法や歩容の違いによって作り出される切り換え制御を、1) J_h 軸回転方向の不変性、2) 乗り心地を支配する後退なしの移動、3) 立脚姿勢の保持に必要な静的エネルギー和の低減、の 3 項目において比較検討し、すべてに優位な制御はなく、三つのいずれを重視するかによって異なる切り

換えが独自に存在することをロボット運動の模擬結果を使って明らかにした。

後半では、PEOPLER-II を制御して移動の様子を観測し、脚型、あるいは車輪型としての操舵、その場旋回の基本動作はもちろん、移動方式の一方から他方への切り換えをビッチ、ヨー、ロールなどの振動なしにスムーズに実現することに成功した。また、CRC の時期に左右の腕姿勢角を違えることで切り換え時の操舵も同時に実現することを確認した。これらの成果により、全動作自由度数を 4 に抑えた 1 台のロボットを歩行用あるいは走行用として使用可能にするのみならず進行方向も同時に変更可能にし、進化させたハイブリッド型移動ロボットの有効性を示した。今後は、個々の機械要素の軽量化を図って自重を減らし、歩行車いすとして屋内外を移動し、階段をも昇降できるロボットの開発に発展させていく予定である。

謝 辞 本研究は、科学研究費（一般研究（C）18560246、平成 18–20 年）と三豊科学技術振興協会（平成 18–19 年）の研究助成を得て実施された。これらの支援に深く感謝する。

参 考 文 献

- [1] T. Yoshioka, T. Takubo, T. Arai and K. Inoue: "Hybrid Locomotion of Leg-Wheel ASTERISK H," J. of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.3, pp.403–412, 2008.
- [2] M.J. Lawn and T. Takeda: "Design of a Robotic-Hybrid Wheelchair for Operation in Barrier Present Environments," Proc. 20th Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.2678–2681, 1998.
- [3] 広瀬 袁, 小沼: "脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の開発", 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.330–336, 2005.
- [4] V. Krovi and V. Kumar: "Optimal Traction Control in a Wheelchair with Legs and Wheels," Proc. 4th National Applied Mechanisms and Robotics Conf., pp.AMR-030, 1995.
- [5] C. Tavelier, E. Ottaviano and M. Ceccarelli: "Design and Problems of a New Leg-Wheel Walking Robot," Proc. 10th Int. Conf. on CLAWAR, pp.319–328, 2007.
- [6] M. Lacagnina, G. Muscato and R. Sinatra: "Kinematics, Dynamics and Control of a Hybrid Robot Wheeleg," J. of Robotics and Autonomous Systems, vol.45, no.3, pp.161–180, 2003.
- [7] D. Germann, M. Hiller and D. Schramm: "Design and Control of the Quadruped Walking Robot ALDURO," Proc. Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction (ISARC), pp.1–8, 2005.
- [8] 中嶋, 中野: "脚車輪分離型ロボットの大地不整地適応歩容", 日本機械学会論文集（C 編）, vol.72, no.721, pp.2926–2693, 2006.
- [9] N.G. Bourbakis: "Kydonas-An Autonomous Hybrid Robot: Walking and Climbing," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.5, no.2, pp.52–59, 1998.
- [10] B.S. Lin and S. Song: "Dynamic Modeling, Stability, and Energy Efficiency of a Quadrupedal Walking Machine," J. of Robotic Systems, vol.18, no.11, pp.657–670, 2001.
- [11] 遠藤, 広瀬: "ローラーウォーカーに関する研究—脚軌道による推進特性の適応的調節—", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.691–698, 2008.
- [12] H. Murakami, M. Sonehara, T. Oikawa, H. Banno and J. Tateishi: "Development of Leg-Wheeled Type Mobile Robot Prototype," IHI Engineering Review, vol.40, no.1, pp.6–11, 2007.
- [13] R. Morales, V. Feliu, A. Gonzalez and P. Pintado: "Kinematic Model of a New Staircase Climbing Wheelchair and its Experimental Validation," J. of Robotics Research, vol.25, no.9, pp.825–841, 2006.
- [14] T. Okada, T. Sakai, K. Shibuya and T. Shimizu: "Hip Joint Control of a Legged Robot for Walking Uniformly and the Self-Lock Mechanism for Compensating Torque Caused by Weight," Proc. 8th Int. Conf. on CLAWAR, pp.198–204, 2005.
- [15] 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤: "対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.2, pp.283–291, 1992.
- [16] W. Yu, O.Y. Chuy, E.G. Collins and P. Hollis: "Analysis and Experimental Verification for Dynamic Modeling of a Skid-Steered Wheeled Vehicle," IEEE Trans. on Robotics, vol.26, no.2, pp.340–353, 2010.
- [17] T. Okada, W.T. Botelho and T. Shimizu: "Leg Control for Changing Locomotion between Leg-type and Wheel-type based on Effective use of Total Power," Proc. 10th Int. Conf. on CLAWAR, pp.365–372, 2007.
- [18] T. Okada, W.T. Botelho and T. Shimizu: "Walking Gait Control for Making Smooth Locomotion Mode Change of a Legged and Wheeled Robot," Proc. 11th Int. Conf. on CLAWAR, pp.711–719, 2008.
- [19] 広瀬, 菊池, 梅谷: "4 足歩行機械の基準旋回歩容", 日本ロボット学会誌, vol.2, no.6, pp.545–556, 1984.

岡田徳次 (Tokuji Okada)

1969 年新潟大学工学部電気工学科卒業。同年電気試験所（後の電子技術総合研究所）に入所。知能ロボットシステムの研究に従事。1987 年 7 月新潟大学工学部に出向。現在 福祉人間工学科教授、工学博士。ロボティクス、インテリジェントセンサなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE などの会員。（日本ロボット学会正会員）

清水年美 (Toshimi Shimizu)

1997 年岐阜大学工学部機械工学科卒業。2000 年同大学大学院工学研究科博士前期課程機械工学専攻修了, 2003 年同大学博士後期課程修了, 2004 年新潟大学大学院自然科学研究科助手, 2007 年助教, 2009 年茨城大学工学部機械工学科準教授, 現在に至る。（日本ロボット学会正会員）

ボテリョ 田中 ヴァーグナ (Wagner Tanaka Botelho)

2002 年ドームボスコ カソリック大学計算機工学科卒業, 2005 年ブラジル防衛大学コンピュータシステム工学専攻修士修了, 2006 年新潟大学大学院博士後期課程入学, 2009 年同課程修了。博士（工学）。（日本ロボット学会学生会員）