歩行型壁面移動機構の脚/胴体質量比とパワーの関係

樋 口 峰 夫*

Relation between Leg/Body Mass Ratio and Power of a Legged Wall Climbing Mechanism

Mineo Higuchi*

Many wall-climbing mechanisms have been developed for inspection of walls of buildings, washing of windows, plant inspection, and so on. It is important to lighten the weight of the wall-climbing mechanism when we design it. Therefore we should use actuators which have minimum power to move the mechanism. We will discuss on a relation of leg and body mass ratio to power demanded for vertical locomotion of the multi-sole biped legged wall-climbing mechanism. In the case of walking mechanisms which move on the horizontal plane, the mass ratio should be zero from a point of energetic efficiency. In the case of wall-climbing mechanisms, a design to minimize the mass ratio is disadvantageous, because, to remove parts from the leg to the body to minimize the mass ratio makes the body heavier and demands more power to move the body. In this paper, the existence of the optimal mass ratio and a design method using the mass ratio is introduced. Additionally, to evaluate the validity of the proposed method, a design example is introduced.

Key Words: Walking Robots, Legged Locomotive Mechanism, Wall Climbing, Power, Optimal Design

1. ま え が き

移動ロボットの今後の活動分野の一つとして、ビルなどの外壁診断や窓拭き、大型プラント構造物の保守点検などメンテナンス作業が考えられており、様々な壁面移動ロボットが開発されている[1][2]。移動ロボットの壁面移動機構には、車輪またはクローラを用いる方式と脚による歩行方式がある。広瀬らは、歩行型壁面移動機構の脚方式として多足2脚方式と動物型脚方式があり、障害物や段差が小規模な場合は多足2脚方式が機構・制御ともに簡潔に構成できるとしている[3]。従来実用を目的として開発された壁面移動ロボットはこの方式のことが多い[4]~[7]。本論文では、機構の軽量化の観点からこの多足2脚方式における、脚と胴体の質量比と移動機構の垂直歩行に必要なパワーとの関係について考察する。

金子らは、水平歩行する移動機構を対象として、エネルギー効率の指標となる移動仕事率について検討を加え、脚と胴体との質量比を小さくすることが移動仕事率を小さくすることを明らかにした[8]。このため、水平歩行する脚式移動機構の設計法として、部品を極力胴体側に取り付けて脚を軽量化する方策がとられることが多い。しかし、垂直歩行する多足2脚方式では、移動仕事率は脚と胴体の質量比によらず一定となる[9]た

め、この比を小さくしてもエネルギー効率を高めることはできない。むしろ、本論文で明らかにするように、部品を脚から胴体に移すとそのぶん重くなった胴体を移動させるのにかえて大きなパワーが必要となる。一般に同種のアクチュエータのパワーと質量はほぼ比例する[10]ので、この場合アクチュエータの質量が増す不利な結果となる。

一方広瀬らは、脚式移動機構に装備されるアクチュエータに必要なパワーは歩行周期中に必要な最大パワーより大でなければならぬことから、複数のアクチュエータを共同駆動させることでアクチュエータの利用率を高めて、必要な最大パワーを得る干涉駆動を提案している[11]。しかし、脚と胴体との質量比とパワーの関係については検討されていない。

本論文では多足2脚方式の壁面移動機構について、脚と胴体の質量比と移動に必要なパワーとの関係について検討し、この質量比に最適値が存在することを明らかにするとともに、この最適値を導き、簡単な設計例によりその有効性を検証する。また、実際の設計において最適質量比から外れた場合の対処方法についても述べる。

2. 質量比とパワー

2.1 考え方

多足2脚方式の壁面移動機構では、重力に抗して移動するために、胴体の移動にも脚の移動にもパワーが必要になる。そこで本報で提案する設計手法では、脚と胴体について、消費する

原稿受付 1997年8月27日

*三菱電機(株)

*Mitsubishi Electric Corporation

Table 1 Velocity and force of the leg

	time	velocity $dX(t)/dt$	force to move the body f_1	force to move the other leg f_2	force to move the leg f_3	force $F(t) = f_1 + f_2 + f_3$
a	$0 \leq t < \beta T - T/2$	$-v$	$-m_b g/2$	0	0	$\frac{-Mg}{2(1+2r)}$
b	$\beta T - T/2 \leq t < \beta T + dt_{st} + dt_{sw} - T/2$	$-v$	$-m_b g$	$-m_l(\alpha + g)$	0	$\frac{-M(r\alpha + (1+r)g)}{1+2r}$
c	$\beta T + dt_{st} + dt_{sw} - T/2 \leq t < T/2 - (dt_{st} + dt_{sw})$	$-v$	$-m_b g$	$-m_l g$	0	$\frac{-M(1+r)g}{1+2r}$
d	$T/2 - (dt_{st} + dt_{sw}) \leq t < T/2$	$-v$	$-m_b g$	$-m_l(-\alpha + g)$	0	$\frac{-M(-r\alpha + (1+r)g)}{1+2r}$
e	$T/2 \leq t < \beta T$	$-v$	$-m_b g/2$	0	0	$\frac{-Mg}{2(1+2r)}$
f	$\beta T \leq t < \beta T + dt_{st} + dt_{sw}$	$-v + \alpha(t - \beta T)$	0	0	$m_l(\alpha + g)$	$\frac{Mr(\alpha + g)}{1+2r}$
g	$\beta T + dt_{st} + dt_{sw} \leq t < T - (dt_{st} + dt_{sw})$	αdt_{sw}	0	0	$m_l g$	$\frac{Mrg}{1+2r}$
h	$T - (dt_{st} + dt_{sw}) \leq t < T$	$\alpha dt_{sw} - \alpha(t - (T - (dt_{st} + dt_{sw})))$	0	0	$m_l(-\alpha + g)$	$\frac{Mr(g - \alpha)}{1+2r}$

Fig. 3 Force of the leg

2.2.3 パワーの導出

立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値を求める.

立脚相では, 脚の速度が一定なので, 駆動力の絶対値が最大のときにパワーが最大になる. これは時刻 t が

$$(\beta - 0.5)T < t < (\beta - 0.5)T + dt_{st} + dt_{sw}$$

のとき (Fig. 2 の区間 b) で, このときパワーの最大値 P_{st} は

次式のようにになる. g は重力加速度である.

$$P_{st} = M(r\alpha + (1+r)g)v/(1+2r) \quad (7)$$

一方, 遊脚相では, 駆動力と速度のそれぞれの絶対値が最大のときにパワーが最大になる. これは時刻 t が

$$\beta T + dt_{st} + dt_{sw}$$

のとき (Fig. 2 の区間 f の右端) で, このときパワーの最大値 P_{sw} は次式のようにになる.

$$P_{sw} = Mr\alpha(\alpha + g)dt_{sw}/(1+2r) \quad (8)$$

2.2.4 質量比の導出

脚の加速度 α が

$$\frac{4v}{(1-\beta)^2 T} < \alpha < g \quad (9)$$

の範囲であるとき, 立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値 P_{st} , P_{sw} を質量比 r ($0 < r$) の関数とすれば, ある r に対して P_{st} と P_{sw} は等しくなる. この点で歩行中の最大パワーは最小になる (付録 A 参照). なお, 従来試作されている壁面作業ロボット [1][2] の速度と寸法 (歩幅) から考えて, 式 (9) の加速度の制限は特に実用性を損なうものではないと考えられる.

Table 2 Condition of walking

velocity	v	0.1[m/s]
acceleration	α	0.6[m/s ²]
duty factor	β	0.6
cycle time	T	5[s]

Fig. 4 Relation between a leg and body mass ratio r and maximum power in stance phase and swing phase

歩容の条件を式 (9) の範囲で **Table 2** のように定めたときの、質量比 r に対する立脚相、遊脚相それぞれのパワーの最大値 P_{st} と P_{sw} の関係の一例を **Fig. 4** に示す。

歩行中の最大パワーが最小になるときの質量比を $\hat{r}$ とする。 $\hat{r}$ は式 (7) と式 (8) が等しいとおくことで次のように求められる。

$$\hat{r} = \frac{gv}{(\alpha + g)(\alpha dt_{sw} - v)} \quad (10)$$

このときの歩行中の最大パワー $\hat{p}$ は次式のようにになる。

$$\hat{p} = \frac{M\alpha g(\alpha + g)v dt_{sw}}{\alpha^2 dt_{sw} + \alpha g dt_{sw} - \alpha v + gv} \quad (11)$$

式 (10) に歩容の条件を代入すれば、適切な脚と胴体の質量比が得られる。これにより例えば、アクチュエータを胴体側と脚側のどちらに搭載するか、といった設計の指針が得られる。

水平面を移動する場合、式 (10) が 0 になるので、脚を軽量化して質量比 r を小さくしたほうがよい。従来水平歩行する脚式移動機構では、エネルギー効率の観点 [9] と脚の制御性の観点 [12] から、脚が軽量である方が有利であるとされていたが、この設計方針は本設計手法の観点からも効率が良いといえる。

3. 計算例と考察

3.1 設計例の比較検討

歩容の条件などは **Table 2** のように設定する。

ここで、総質量が 50 [kg] である 2 台のロボット、ロボット A およびロボット B を仮定する。ロボット A は **Table 2** の条件を式 (10) に代入して求めた最適な質量比 ($r = 0.61$, $M_b = 22.5$ [kg], $M_l = 13.7$ [kg]) であり、ロボット B はこれより相対的に脚が軽量 ($r = 0.1$, $M_b = 41.7$ [kg], $M_l = 4.2$ [kg]) であるとする。

Fig. 5 Comparison of power of two robots

ロボット A とロボット B の歩行 1 周期中のパワーの変動を **Fig. 5** に示す。図のように、ロボット A (実線) では遊脚相と立脚相の最大パワーが等しく、36 [W] になっている。これに対し、ロボット B (破線) では最大パワーは立脚相が 45 [W]、遊脚相が 11 [W] となり、立脚相の側が大きい。この例では、ロボット A の方がロボット B より最大パワーが約 2 割少ないので、アクチュエータや減速機を 1 番手小さいものにできる可能性がある。アクチュエータや減速機を 1 番手小さいものにできれば、その分軽量化できることになる。また、ロボット B の最大パワーに見合うアクチュエータを採用した場合には、質量比をロボット A のように最適化することにより、可搬質量を約 12 [kg] 増加できる。

3.2 考察

ここでは歩容の条件との関係、移動仕事率との関係、壁面を下る場合、設計への適用の仕方の 4 点について述べる。

3.2.1 実機の条件による歩容条件の補正

歩容の条件から式 (10) (11) を用いて最適な質量比 $\hat{r}$ と最大パワー $\hat{p}$ を求めて、これらの値に沿って設計を行った場合、実機の質量比とアクチュエータのパワーを完全に $\hat{r}$ と $\hat{p}$ に一致させることは一般に困難である。そこで、実機の質量比を r_{pr} 、伝達系の効率を見込んだ実機のアクチュエータのパワーを p_{pr} としたとき、歩容条件を補正してアクチュエータを効率よく使う方法について、以下で述べる。

立脚相と遊脚相の最大パワーの式である式 (7) (8) を、それぞれ歩容の条件 α , β , T , v , r の関数と考え、 $p_{st}[\alpha, v, r]$, $p_{sw}[\alpha, \beta, T, v, r]$ とおく。

$$P_{st}[\alpha, v, r] = \frac{M(r\alpha + (1+r)g)v}{1+2r} \quad (7)'$$

$$P_{sw}[\alpha, \beta, T, v, r] = \frac{Mr\alpha(\alpha + g)dt_{sw}}{1+2r} \quad (8)'$$

実機の歩幅 s_{pr} は歩容の条件を用いて次式のように表される。

$$s_{pr} = v_{pr}\beta T_{pr} \quad (12)$$

ここで v_{pr} , T_{pr} はそれぞれ実機の歩行速度と歩行周期である。また、立脚相と遊脚相の最大パワーと実機のアクチュエータの

パワーが一致したとき、次式が成り立つ。

$$p_{pr} = P_{st}[\alpha_{pr}, v_{pr}, r_{pr}] \quad (13)$$

$$P_{pr} = P_{sw}[\alpha_{pr}, \beta, T_{pr}, v_{pr}, r_{pr}] \quad (14)$$

ただし α_{pr} は実機の脚の加速度であり、デューティ比 β は設計と実機とで一致させると考える。ここで、式(12)を T_{pr} について解いたものと、式(13)を α_{pr} について解いたものを式(14)に代入し、これを v_{pr} について解けば、実機の最大速度が求められる。

例えば 3.1 節の設計例では、最適な質量比 $\hat{r}$ とパワー $\hat{p}$ はそれぞれ 0.61, 36 [W] だが、これらを用いて設計した実機の効率を見込んだアクチュエータのパワー p_{pr} が 50 [W]、質量比 r_{pr} が 0.7 になったとする。このとき、上記の手順で求めた実機の最大速度は、設計時の歩容条件 $v = 0.1$ [m/s] に対して、 $v_{pr} = 0.137$ [m/s] になる。このとき、歩行周期は設計時の歩容条件 $T = 5$ [s] に対して、 $T_{pr} = 3.66$ [s] となる。なお、歩行周期をこれより大きくなるように脚の軌道を制御すれば、歩行速度は上記の v_{pr} を最大速度として、制御することができる。

3.2.2 移動仕事率との関係

広瀬らは移動仕事率を 4 種類に分類しており、このうち、移動機構の総質量を移動するのに要する総エネルギーとしての移動仕事率は、壁面移動機構の場合には 1 になる [9]。歩行 1 周期に要するエネルギー E は

$$E = (M_b + 2M_l)gvT \quad (15)$$

となるので、上記移動仕事率は質量比 r と無関係である。

しかし質量比を最適化して 1 番手小さいアクチュエータにできれば、総質量が減る、あるいは可搬質量が増える。ここで総質量が減ったぶん、可搬質量を増やしても、アクチュエータはそのままで可搬質量を増やしても、正味の仕事率 [9]、すなわち移動機構の可搬質量を移動するのに要する総エネルギーは増えることになる。

3.2.3 壁面を下る場合

上りと同じ速度で下るときを考える。このとき、減速比が大きいとすれば、下りのときには上りほどの力を出さなくてもよい。したがって、下りのパワーは上りより小さい。すなわち上りの条件で計算した質量比に従って設計すれば、アクチュエータのパワーは十分である。

3.2.4 設計手順

本報の考え方を適用した設計手順の一例を示す。アクチュエータとしてはサーボモータを使用した場合を考える。

- 1) 歩容の仕様 (Table 2 参照) と可搬質量を与える。
- 2) 移動機構の総質量を見積もる。
- 3) 式 (10) (11) を用いて最適な質量比 $\hat{r}$ とこのときの最大パワー $\hat{p}$ を求める。
- 4) (1~2) $\times \hat{p}$ の定格パワーのモータとこれに合わせた減速機を仮選定する [13]。このモータと駆動系が手順 2) で行った質量の見積もりに見合うものかを確認。適当でなければ手順 2) へ戻る。

- 5) 駆動系、構造、制御装置、可搬質量などを $\hat{r}$ に合うように切り分けて、胴体と脚に配置する。
- 6) 手順 4) で仮選定したモータの効率を見込んだパワーと手順 5) で配置した質量比をそれぞれ p_{pr} , r_{pr} とおき、3.2.1 項に従って歩容の仕様を修正する。
- 7) 手順 6) で修正した歩容の仕様で動いたときの最大トルクと実効トルクを求め、手順 4) で仮選定したモータがこれらが発生するのに適当かを確認する。

従来の設計法では手順 1), 2) からパワーを求めてモータを仮選定し、手順 7) に行っていたが、本設計法では手順 3) から 6) の過程が加わっている。

4. あ と が き

多足 2 脚方式の壁面移動機構について、最小限のパワーのアクチュエータを選定できるように、脚と胴体の質量比を最適化する、新しい設計手法を提案した。

機構の設計パラメータとして、質量比すなわち胴体質量と脚質量の比に着目した。この値を変化させることは、胴体と脚との間の質量の配分を変えることを意味する。

特定の歩容条件のもとで、立脚相と遊脚相で必要になるパワーの最大値が等しいときに、歩行 1 周期中の最大パワーが最小になる。このため、両者のパワーが等しくなるように質量比を設計すれば、最小限のアクチュエータを選定できる。そこで、質量比と、立脚相と遊脚相のパワーの関係を示し、両者のパワーが等しいときの脚と胴体の質量比を導いた。次に簡単な計算例を示し、本設計手法の有効性を示した。更に実際の設計において質量比が最適値からやや外れた場合の対処方法についても述べた。

従来脚式移動機構では、脚の質量は軽いほど良いとされていたが、多足 2 脚方式の壁面移動機構では必ずしも軽ければ良いのではなく、最適な値が存在することが分かった。

最後に本論文執筆に当たり、熱心に御討議いただいた三菱電機 (株) 萩原史朗主幹技師長に深く感謝します。

参 考 文 献

- [1] 特集壁面作業ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.557-620, 1992.
- [2] 西亮: “壁面移動ロボット”, ロボティクス入門—移動ロボットの基礎と実際—, 日本機械学会講習会教材, no.900-75, pp.19-24, 1990.
- [3] 広瀬, 長久保: “歩行型壁面作業ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.575-580, 1992.
- [4] P. Kroczyński and B. Wade: “The Skywasher: A Building Washing Robot,” Proceedings of 17th Int. Symp. on Industrial Robot, pp.1-11/1-19, 1987.
- [5] 西上, 水島: “ガラス拭きロボット「カナディアン・クラブ」”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.596-598, 1992.
- [6] 藤田はか: “球形ガスホルダー自動検査ロボットの開発について”, ロボット, no.50, pp.98-104, 1986.
- [7] (社) 日本ロボット工業会: ロボット導入便覧 (仕様・利用事例) 非製造業, p.330, (社) 日本ロボット工業会, 1997.
- [8] 金子, 節, 谷江, 阿部: “エネルギー効率の観点からみた歩行機械の相似性に関する基礎的研究”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.3, pp.207-218, 1985.
- [9] 広瀬, 梅谷: “歩行機械のエネルギー効率に関する基本的考察”, 計測自動制御学会論文集, vol.15, no.7, pp.76-81, 1979.
- [10] 広瀬, 生田, 梅谷: “形状記憶合金アクチュエータの開発”, 日本ロ

ボット学会誌, vol.4, no.2, pp.89-100, 1986.

- [11] 広瀬, 佐藤: “多自由度ロボットの干涉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-135, 1989.
 [12] 古荘: “歩行ロボットの研究展開”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.306-313, 1993.
 [13] 日経メカニカル編: メカ設計術シリーズ 2, pp.70-79, 日経 BP 社, 1989.

付 録 A

立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値 P_{st} , P_{sw} を質量比 $r(0 < r)$ の関数とすれば, ある r に対して P_{st} と P_{sw} は等しくなり, この点で歩行中の最大パワーが最小になることについて説明する.

式 (7) を質量比 r で微分すれば次式が得られる.

$$\frac{dP_{st}}{dr} = \frac{Mv(\alpha - g)}{(1 + 2r)^2} \quad (\text{a-1})$$

$\alpha < g$ のとき, 式 (a-1) は負になる. すなわち, 立脚相のパワーの最大値 P_{st} は, 脚の加速度 α が重力加速度 g より小的时候, 質量比 r に対して単調減少である.

一方, 式 (8) を質量比 r で微分すれば, 次式が得られる.

$$\frac{dP_{sw}}{dr} = \frac{M\alpha(\alpha + g)dt_{sw}}{(1 + 2r)^2} \quad (\text{a-2})$$

式 (a-2) は常に正になる. すなわち, 遊脚相のパワーの最大値 P_{sw} は, 質量比 r に対して単調増加である.

次に質量比 r を 0 とおく. すなわち, 脚の質量を 0 とする. このとき, 立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値を P_{st0} , P_{sw0} とすれば, これらは式 (7) (8) よりそれぞれ

$$P_{st0} = Mgv \quad (\text{a-3})$$

$$P_{sw0} = 0 \quad (\text{a-4})$$

となるので,

$$P_{sw0} < P_{st0} \quad (\text{a-5})$$

の関係が成り立つ.

次に質量比 r を ∞ とおく. すなわち, 胴体の質量を 0 とする. このとき, 立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値を $P_{st\infty}$, $P_{sw\infty}$ とすれば, これらは式 (7) (8) よりそれぞれ

$$P_{st\infty} = Mv(\alpha + g)/2 \quad (\text{a-6})$$

$$P_{sw\infty} = M\alpha(\alpha + g)dt_{sw}/2 \quad (\text{a-7})$$

となる. ここで式 (4) を参照する. 式 (4) の左辺と右辺の括弧内の項に注目すれば, デューティ比 $\beta > 0.5$ なので左辺の方が大である. よって括弧内以外の項に注目すれば $\alpha dt_{sw} > v$ となるので,

$$P_{st\infty} < P_{sw\infty} \quad (\text{a-8})$$

の関係が成り立つ.

以上と式 (6) をまとめれば, 次のことが言える. 脚の加速度 α が

$$\frac{4v}{(1 - \beta)^2 T} < \alpha < g \quad (\text{a-9})$$

の範囲であるとき, 立脚相, 遊脚相それぞれのパワーの最大値 P_{st} , P_{sw} を質量比 $r(0 < r)$ の関数とすれば, ある r に対して P_{st} と P_{sw} は等しくなる. この点で歩行中の最大パワーは最小になる.

樋口峰夫 (Mineo Higuchi)

1959 年 7 月 14 日生. 1985 年武蔵工業大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修士課程修了. 同年三菱電機株式会社に入社. 応用機器研究所を経て, 現在産業システム研究所勤務. 産業用ロボット, 移動ロボット等の開発に従事. 日本機械学会の会員. (日本ロボット学会正会員)