油圧駆動型6脚ロボットCOMET-IVの高速歩行制御

High Speed Walking Control of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET-IV

○ 学 今村 翔太 (千葉大) 正 野波 健蔵 (千葉大)

Shota IMAMURA and Kenzo NONAMI, Chiba University

In this paper, high speed walking of Hexapod robot is taken up. This robot has a design specification about walking speed. That is 1 km/h walking. Limit capability of the hardware was measured to design new foot trajectory for high speed walking. With the spec in mind, new foot trajectory was designed. Parameters in this trajectory were decided in the range where limit was not exceeded. As a result, it became clear that the maximum walking speed for hardware is 0.45 km/h. To walk at 1 km/h, improvement of hardware is necessary. Partial Model Matching Techniques was applied to design PID controller. But the derivation gain became minus. The reason was the model parameter. From this result, it was unveiled that Partial Model Matching Techniques was not able to be applied to this model.

Key Words: Hexapod Robot, High Speed Walking, Foot Trajectory, Partial Model Matching Techniques

1. 緒言

近年では、科学技術の発達に伴い、災害現場での危険作業を人間に代わり行うロボットが現実味を帯びてきており、早期実用化が求められている。こういった危険作業現場は、多くの場合が未知の不整地であり、危険作業支援ロボットには複雑な地面に対する柔軟な順応性、走破性が求められる。ロボットの移動形態には、車輪型、クローラ型、脚移動型などが代表的であるが、その中でも、車輪型、クローラ型はすでに実用化がされている。しかし、脚移動型の実用化は未だ成されていない。そこで、本研究グループではこのような問題に対し、6脚歩行ロボットによる地雷除去作業を提案し、地雷探知6脚ロボットCOMET-IVの研究開発を行ってきた[1][2]。

COMET-IVの設計仕様には、1 km/hでの移動というものが入設定されているが、いまだ実現には至っていない。そこで本研究では、平地での高速歩行を目的とする。高速歩行に対するアプローチとして、ハードウェアを改善する手法と、ソフトウェアを改善する手法の二つが考えられる。現在段階では、ソフトウェアがハードウェアの性能を完全に引き出しているとは言いがたい。そのため、ハードウェアの改善よりも、先にソフトウェアの改善を行い、性能を完全に引き出した後にハードウェアの改善に移行するのが妥当だと言える。ソフトウェアの要素として、脚をどう動かすかを決定する足先軌道と、その足先軌道を以下に忠実に再現できるかを決定する制御器の、二つが挙げられる。本稿では、ハードウェアの性能を最大限に引き出すためのソフトウェアの改善として、高速歩行用の足先軌道の設計と、部分的モデルマッチング法[3]によるPID制御器の設計について述べる。

2. 制御対象

油圧駆動型6脚ロボットCOMET-IVをFig.1に示す。歩行動作に用いる脚機構と制御の流れはFig.2の通りである。脚機構は4自由度を有し、肩部を油圧モータ、もも部・すね部・足先部を油圧シリンダにより駆動する。各関節回転角をポテンシオメータ、もも部・すね部の油圧シリンダ内圧力を圧力センサ、胴体姿勢角を姿勢センサにより検出し、A/D変換器を介してLocomotion Computerに取り込む。Host Computerから

Fig. 1 Overview of COMET-IV

Fig. 2 System architecture of COMET-IV

Locomotion Computerにダウンロードされたプログラムにより歩容生成を行い、制御器に目標軌道を与え、D/A変換器を介して制御入力を出力する。出力された制御入力はバルブコントローラによって増幅され、比例電磁弁のスプールを変位させることで各アクチュエータを駆動する。

3. 足先軌道の設計

3.1 ハードウェアの限界性能調査

ハードウェア、つまり COMET-IV の脚関節には、出力することのできる関節角度の最大角速度が存在する。その最大角速度を超えた角速度を要求するような足先軌道は、ソフトウェアをいかに改善しても実現することができない。そこで、足先軌道を設計する前に、ハードウェアの限界性能を調査する。

各脚の Shank 関節, Foot 関節に、最大入力である $\pm 9.5 \text{ V}$ を印加し、その時の関節角度の時刻歴応答を得る。その後、ノイズ低減のために移動平均フィルタを通した後微分し、各関節の角速度を得る。関節角速度には脚によって個体差があったが、その中でも一番遅いものは leg 1 であった。この実験で得られた leg1 の関節角度の時刻歴応答を Fig.3 と Fig.4 に、それらを微分することで得られた関節角速度を Fig.5 と Fig.6 に示す。

Fig.3 と Fig.5 を比較する。Fig.5 では、速度が正から負に

Fig. 3 Experimental result of leg1 shank

Fig. 4 Experimental result of leg1 foot

Fig. 5 Angular velocity of leg1 shank

Table 1 Maximum speed of each joints

	Positive direction	Negative direction
shank	25 deg/s	-20 deg/s
foot	30 deg/s	-25 deg/s

Fig. 6 Angular velocity of leg1 foot

反転する直前で、スパイク状に加速している様子が見られる。一方、負から正に反転する付近では、ほぼ一定の速度を維持している。Fig.3 と見比べると、関節角度が約 100 deg 以上の範囲では高速に、約 100 deg 以下の範囲では低速に動くことがわかる。通常の歩行で用いられる関節角度の範囲は、この2つの領域にまたがっている。そのため、低速域の速度を上限とした足先軌道の設計が求められる。よって shank 関節の限界速度を低速域の速度と設定する。

Fig.4 と Fig.6 についても同じ様子が見られる。Foot 関節の高速域は約 25 deg 以上であり、それ以下は低速で動く。通常の歩行に用いられる範囲は低速域であるので、こちらも限界速度を低速域の速度と設定する。

これらにより得られた関節の正方向、負方向の限界速度を Table 1 に示す。

3.2 現在の COMET-IV の足先軌道

現在、COMET-IV の足先軌道には、低衝撃足先軌道 [4] と呼ばれる変形サイクロイド軌道を採用している。この軌道は、離着地時に Z 軸方向の速度と加速度が零になり、かつ連続となる足先軌道である。低衝撃足先軌道の図を Fig.7 に示す。

COMET-IV の脚は 4 自由度を有し、冗長性を持った脚部となっている。この冗長性に対しては、逆運動学の際に足裏を地

Fig. 7 Low Impact Foot Trajectory

Fig. 8 High Speed Walking Trajectory

面と平行にするという拘束条件を設けることにより対応している。

3.3 高速歩行用足先軌道の設計

高速で歩行するためには、歩幅を広げたり、1周期の時間を短くする必要がある。歩幅は脚の可動範囲に制限され、あまり大きくすることができない。そこで歩行周期を速くすることで高速化を図る。歩行周期を速めた際に発生する問題として考えられるのが、着地時の衝撃と、追従性の低下である。そこで、着地時に衝撃が発生しにくく、速い周期でも追従しやすい軌道として、高速歩行軌道 (High Speed Walking Trajectory) を開発する。

まず、着地時の衝撃について考察する。現在用いられている低衝撃足先軌道は、着地、離地時に鉛直方向の速度が0となるような足先軌道である。そのため、完全に軌道に追従できれば、衝撃は発生しないはずである。しかし、実機に適用した場合、追従誤差などの要因で、鉛直方向に速度を持った状態で接地してしまう可能性がある。その点を考慮した場合、着地動作はできる限り低速で行われることが望ましい。

しかし、着地動作を低速にするために全体の動きを低速化してしまえば、高速歩行という趣旨から外れる。そこで、遊脚期前半の動作スピードを速め、遊脚期後半の動作を低速にするという手法をとる。目標値が急峻になると、追従性が悪くなると考えられるが、遊脚期は足が地面から離れているため、平地を歩行する場合目標値に正確に追従する必要はないと考えられる。

次に、追従のしやすさについて考察する。歩行周期が速くなると、急峻な目標値への追従は難しくなる。よって、なるべく滑らかに変化する目標値を与える必要がある。特に、支持脚中は大きな力が加わるため追従性が悪化しやすく、また各支持脚の動きが同期していない場合、胴体が振動してしまう。そのため支持脚中は特に追従性が重要になる。

これらの点を考慮し、作成した足先軌道の図を Fig.8 に示す。なお、歩幅 S_o を 1 m、脚上げ高さ H_o を 0.2 m としており、図中の数字は後述する軌道説明の番号である。また、この軌道は y 方向 (横進方向) への 3 脚支持歩行に用いる軌道である。x 方向 (前進方向) への軌道は、歩行に用いる関節が異なるため、別途考える必要がある。

I 支持脚動作

従来の低衝撃足先軌道の支持脚時の動作は、速度 $S_o/2T_s$ の等速直線運動である。 T_s は遊脚時間である。低衝撃足先軌道では、着地動作の最後が、z 方向の速度が 0、y 方向の速度が $S_o/2T_s$ となっているため、速度が連続となっている。しかし、

Table 2 Parameters of High Speed Walking Trajectory

S_o	1 m	K_1	$\frac{1}{10}$
H_o	0.2 m	K_2	$\frac{1}{2}$
T_s	8 s	H_{II}	0.1 m

本足先軌道では、着地動作をゆっくりと行っているため、着地動作終了時の y 方向速度が遅くなっている。よって速度 $S_o/2T_s$ の等速直線運動で支持脚動作を行うと、着地時に急加速することになる。この点を考慮し滑らかな加速を行う直線運動を作成した。なお、この動作に用いる時間は T_s である。

II 離地動作

支持脚動作から滑らかに離地する動作として、円運動を採用する。支持脚動作終了時の y 方向速度を保ちつつ、滑らかに地面から離れる。この動作に用いる時間は、 $1 > K_1 > 0$ の任意の定数 K_1 を用いて $K_1 T_s$ で表される。また、離地動作の足の持ち上げ高さ (=円運動の半径) を H_{II} とする。

III 振り上げ動作

この動作は、できる限りすばやく脚を前に振り出すことを目的とした動作である。この動作中の各関節の角度は線形的に変化する。遊脚期に入ってから $K_2 T_s$ の時間が経過したら次の動作に移る。ただし、 K_2 は $1 > K_2 > K_1$ となる任意の定数である。つまり、振り上げ動作に用いる時間は $(K_2 - K_1) T_s$ である。

IV 着地動作

遊脚期の残りの時間で、着地動作を行う。着地動作には低衝撃足先軌道を用いる。

足先軌道に用いられる各パラメータを、限界性能を超えないように設定する。数回の試行錯誤の結果、Table 2 に示す値を得た。

このパラメータによる歩行速度は、0.45 km/h であり、目標としている 1 km/h には届かない結果となった。これより、1 km/h の歩行を目指すのなら、ハードウェアを改善する必要があることがわかった。

4. 制御系設計

3.3 にて、1 km/h の歩行は出来ず、0.45 km/h が限界だということがわかったが、0.45 km/h の歩行は未だ実用化には至っておらず、現状の制御器では十分な追従性を得られない。そこで、0.45 km/h での歩行を可能とする制御系を設計する。また、足先軌道の各部分において、使用する制御器を切り替える手法を採用する。

高速歩行軌道において、振り上げ動作は高速な動作が要求されるが、脚が宙に浮いているため、厳密に追従する必要がない。そこで、振り上げ動作には最適トラッキング制御を用い、すでに阿久津らによって実装が済んでいる [5]。本稿では、残りの動作に適用する制御器を設計する。

4.1 部分的モデルマッチング法による PID 制御器の設計

着地、指し脚、離地動作では、足先が環境と接触するので、ある程度の速度を保ちつつ、高い追従性が要求される。そこで、部分的モデルマッチング法 [3] を用い、PID 制御機を設計する。現在も PID 制御器が用いられているが、その制御定数は試行錯誤的に決定されたもので、最適なパラメータとはい

難い。そこで、本手法により PID 制御器の制御定数を求める。

部分的モデルマッチング法とは、理想的な応答を示す参照モデルを用意し、次に制御器とプラントからなる閉ループ系と参照モデルを等しいと置き方程式をつくり、それを制御定数について解くことにより、制御定数を求める手法である。

制御器の伝達関数 $G_c(s)$ を式 (1) とする。

$$G_c(s) = \frac{c_0 + c_1s + c_2s^2 + \dots}{s} \quad (1)$$

PID 制御器では、 C_0 が積分ゲイン、 C_1 が比例ゲイン、 C_2 が微分ゲインとなる。

次に、プラントの数学モデルを式 (2) と置く。

$$G_p(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots} \quad (2)$$

計算の都合上、プラントの数学モデルを分母系列表現に書き直したものを式 (3) に示す。

$$G_p(s) = \frac{1}{h_0 + h_1s + h_2s^2 + \dots} \quad (3)$$

ただし、

$$h_0 = \frac{a_0}{b_0} \quad (4)$$

$$h_1 = \frac{a_1 - b_1h_0}{b_0} \quad (5)$$

$$h_2 = \frac{a_2 - b_1h_1 - b_2h_0}{b_0} \quad (6)$$

$$h_3 = \frac{a_3 - b_1h_2 - b_2h_1 - b_3h_0}{b_0} \quad (7)$$

⋮

である。

参照モデルは任意の伝達関数を用いることが出来るが、ここでは参考文献 [3] に紹介されている参照モデル $W_d(s)$ を用いる。

$$W_d(s) = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1\sigma s + \alpha_2\sigma^2s^2 + \dots} \quad (8)$$

参照モデルは数列 $\{\alpha_i (i = 0, 1, 2, \dots)\}$ と係数 σ によって表される。PID 制御器の場合、 σ は式 (1) 中の c_3 を 0 にする値を採用する。

式 (1)~ 式 (8) より、制御定数を求めると、次のようになる。

$$c_0 = \frac{h_0}{\sigma} \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{h_1}{\sigma} - \alpha_2h_0 \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{h_2}{\sigma} - \alpha_2h_1 - (\alpha_2^2 - \alpha_3)h_0\sigma \quad (11)$$

$$c_3 = \frac{h_3}{\sigma} - \alpha_2h_2 - (\alpha_2^2 - \alpha_3)h_1\sigma - (\alpha_2^3 - 2\alpha_2\alpha_3 + \alpha_4)h_0\sigma^2 \quad (12)$$

⋮

これらの式を用いて、制御定数を求める。なお、プラントの数学モデルには阿久津らが導出したモデル [5] 式 (13) を用いる。

$$G_p(s) = \frac{1 + T_zs}{s(1 + 2\zeta T_ws + (T_ws)^2)} \quad (13)$$

様々な $\{\alpha_i\}$ を用いて計算を行ったが、どの結果においても c_2 、つまり微分ゲインが負の値になり適切な結果が得られなかった。

4.2 考察

微分ゲインが負になる原因を考察する。式 (2) と式 (13) より、

$$a_0 = 0 \quad (14)$$

$$a_1 = 1 \quad (15)$$

$$b_0 = 1 \quad (16)$$

である。それにより式 (4)、式 (5) から、

$$h_0 = 0 \quad (17)$$

$$h_1 = 1 \quad (18)$$

となる。また、 $\{\alpha_i\}$ 、 σ は参照モデルが安定であるために正である必要がある。これらを式 (11) に代入すると、 $c_2 > 0$ となる条件が次のように求められる。

$$h_2 > \alpha_2h_1\sigma \quad (19)$$

上式の右辺は正である。しかし、計算される h_2 はほぼ全ての関節において負の値をとる。以上より、このモデルには本手法を適用することができないとわかった。

5. 結言

本研究では COMET-IV の高速歩行を目指し、ソフトウェアの改善を行った。以下にその内容をまとめる。

- COMET-IV の各脚 Thigh, Shank 関節に最大入力を印加し、関節速度のハードウェア的限界を計測した。
- 高速歩行用の足先軌道を設計し、限界性能を元にパラメータを決定した。現状のハードウェアでは 1 km/h の歩行が出来ないことがわかった。
- 高速歩行用の制御器を設計するために、部分的モデルマッチング法により PID 制御器の設計を行った。しかし、このモデルには本手法が適用できないことがわかった。

今後の課題としては以下のものが挙げられる。

- 単純な PID 制御器ではなく、微分先行型などの様々な PID 制御器について部分的モデルマッチング法を適用できるかを検証する。
- 上記の検証で望ましい結果が得られなかった場合は、他の手法により制御器を設計する。

文 献

- [1] 菅井晴彦 6 脚歩行ロボットの最適化設計と制御に関する研究 千葉大学大学院修士論文 (2005)
- [2] 奥雅希 危険作業支援 6 脚歩行ロボットのモデリングと制御 千葉大学卒業論文 (2005)
- [3] 森泰親 演習で学ぶ PID 制御 森北出版株式会社 (2009)
- [4] 榎原義宏, 菅和俊, 細田祐司, 服部誠, 藤江正克 4 脚歩行機構のための低衝撃足先軌道 日本ロボット学会誌, 8 巻 6 号, pp.22-31, (1990)
- [5] 阿久津安永 油圧駆動型 6 脚ロボットの 2 自由度制御による高速歩行 千葉大学大学院修士論文 (2010)