

研究結果報告書

1. 研究題目名

アシストスーツに適応した磁力弾性アクチュエータの研究

2. 担当者

徳島県立工業技術センター

電子・情報技術担当 主 任 酒井 宣年

電子・情報技術担当 主任研究員 麻植 雄樹

株式会社ヨコタコーポレーション

機械部 技術開発室 佐藤 正和

3. 結果報告

○目的

装着型アシストスーツはエア式または電気式が一般的である。現状では非常に高価でありかつ、装着性に課題がある。電気式はモータが使用され回転トルクをそのまま人へのアシスト力として伝達する。しかし、わずかな振動や挙動、応答性能がそのまま人へと伝わり不快感をもたらすことが課題である。

本研究はアクチュエータに弾性特性の機構動作と制御手法を用いることを検討した。

○研究内容

装着型アシストスーツでは、モータ式のアクチュエータを使用したものが一般的である。スーツ構造は左右の腰それぞれにモータを密着させた外骨格型スーツを基本とし、モータの回転力を腰の曲げ姿勢から直立姿勢への移行動作に直接的に影響する方式が採用されている。しかし、モータ制御には速度、トルク、回転方向の最適な制御をおこなう必要があるが、人の動作は予測困難であるため、応答性に遅れが生じ、結果的に実際の使用現場において装着性の悪さや性能の低下という評価に影響する。人工筋肉に代表されるエア式のアクチュエータでは、空気の持つ圧縮、膨張の特性が人と機械動作のあいだに必要な「あそび」を生むため、遅れ特性を緩和し装着性が向上する。しかし常に空気が充填されている場合、腰曲げ動作にもトルクがかかり無駄にエネルギーを消費することや、これを回避するためには「抜く」、「充填」などの制御機構が必要となりコンプレッサーなどの大掛かりな設備が必要となる。これらの課題の解決手法として、空気と類似した弾力特性を模擬する磁力制御型アクチュエータを提案し研究を実施した。



本研究で開発したアクチュエータについて、企業が独自開発する One-motor 方式アシストスーツへの搭載を検討している。現在も開発中である本スーツのアシスト動力源も一般的なものと同様のモータ方式であるが、モータは背面上部に取り付けた 1 台のみでの構成となる。アシストトルクへの伝達方法にワイヤーを使用しており、1 本のワイヤーの両端を、左右それぞれの腰回転機構を介して、大腿部支点パッド部の回転機構に接続し、ワイヤーのほぼ中心位置にある支点プーリーを用いてワイヤー方向の調整を行う。支点プーリーは上下方向にリニアガイドレール上をスライドし、直立姿勢時に上部、腰曲げ動作時は下部へスライドする。支点プーリーは背面上部にあるモータが巻取りを行うことで上部へスライドする。開発試作のアシストスーツを写真 1 に、装着状態を写真 2 から写真 4 それぞれに示した。

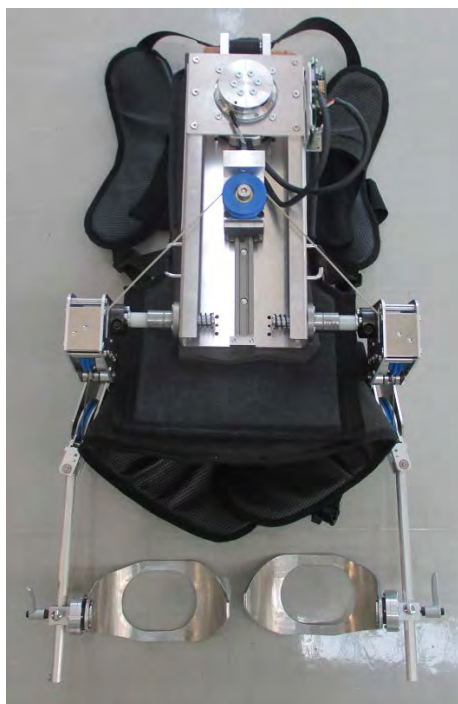


写真 1.
開発試作のアシストスーツ

本方式は背面モータの巻取りにより支点プーリーをスライドさせ、ワイヤーへの引張りにより腰部の回転力を発生させることで、持ち上げ動作時におけるアシスト力を発生させる。これにより、モータおよび付随するドライバ機器が半減し、低コスト化および軽量化が図れることが特徴である。本研究においてもアシスト効果の検証を行ったが他製品と比較して、同程度のアシスト効果があることを確認している。

本方式は背面モータの巻取りにより支点プーリーをスライドさせ、ワイヤーへの引張りにより腰部の回転力を発生させることで、持ち上げ動作時におけるアシスト力を発生させる。これにより、モータおよび付随するドライバ機器が半減し、低コスト化および軽量化が図れることが特徴である。本研究においてもアシスト効果の検証を行ったが他製品と比較して、同程度のアシスト効果があることを確認している。



写真 2. 装着 1



写真 3. 装着 2



写真 4. 持ち上げ動作



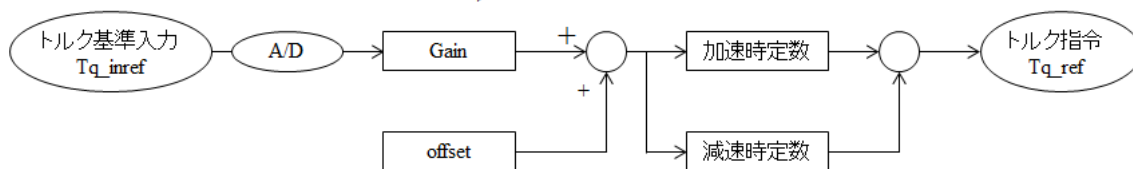
競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。
<https://hojo.keirin-autorace.or.jp/>

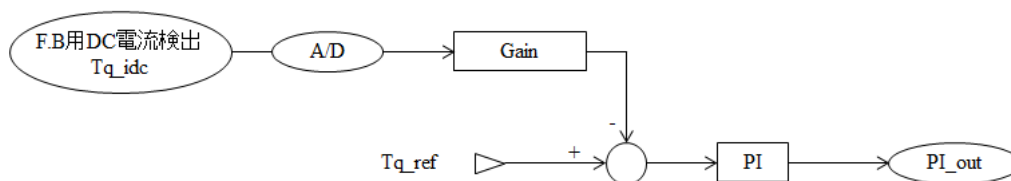
試験の結果、腰曲げから直立姿勢への移行動作を行う場合の支点プーリーのスライド距離は最大でも 50mm ほどとわずかであることが判明した。本方式では、支点プーリーの上下動作が重要であり、本来であれば回転するモータを用いる必要性がない。本研究では、アクチュエータは直動で動作し、ワイヤーへの張力を発生させるソレノイド機構を検討した。ソレノイドは ON/OFF 制御のみで使用されるが、ストロークの移動期間内において磁力の吸着力と反発力を制御する定電流およびパルス幅制御を行った。図 1 には、試験で用いた制御基板の制御ブロック概略図を示した。また、写真 5 に試作した制御基板を示した。制御基板の CPU には、RX62T マイコンを使用した。

(1)トルク指令

- 1. トルク指令
- 2. 角度指令
- ※ポテンションメータによる可変電圧指定 (0-5Vmax)



(2)トルクF.B制御



(3)PWM選択出力

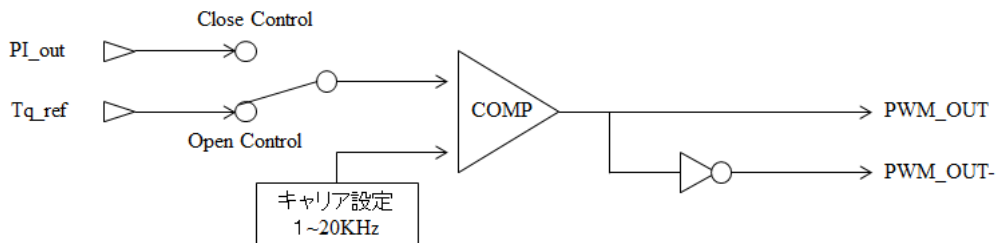


図 1. 制御ブロック概略図

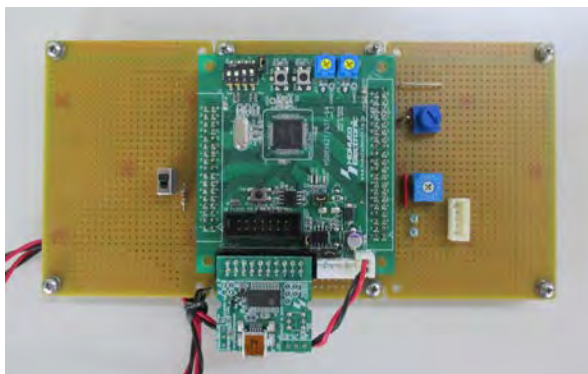


写真 5. 実験用試作制御基板



写真6. サイレント DC ソレノイド
(SSD-1864)



写真7. ロングストロークソレノイド
(CH1284025)

写真6は国際電業株式会社製のサイレント DC ソレノイドを示した。本研究では、SSD-1864 および SSD-1664 の2種を用意し検討を行った。また、写真7はタカハ機工製のロングストロークソレノイドのCH1284025を示した。表1にはそれぞれのソレノイドの仕様を示した。

各メーカー取扱品において、以下の仕様条件を基準に選定を行った。

- ① DC24V 電圧駆動である
- ② 長ストロークである
- ③ 吸引力が大きい

現在のアシストスーツに使用している軽量薄型サーボアクチュエータの定格トルクは、ソレノイド単機では不足すると考えていたため、当初より複数

台の並列使用を考えていた。しかし、調査および実験を実施することで、アシストスーツへの実用化には多くの課題があることが判明した。

表1. ソレノイドの特性

型式	① SSD-1864	② SSD-1664	③ CH1284025
吸引力範囲	1.57～23.52N	0.86～15.19N	1.3～5.4N
最大ストローク	25mm	20mm	35mm
重量	821g	543g	480g

・課題1

実験結果から、ソレノイド自身の発熱が非常に大きいことが判明した。パルス制御を行うと連続通電およびトルクを確保するため最大パルス幅での駆動時間が長くなることが判明した。温度上昇を抑制するために、温度フィードバックによるパルス制御も検討したが、必要トルクの確保が難しく、制御挙動が大きくなるなど良好な結果は得られなかった。

・課題2 および課題3

選定したソレノイドは、DC タイプでも各メーカーのストロークが最長であるが、最大でも35mmと実用化のためのスライド距離50mm満足するためにカスタムでの製造が必要となる。また、ソレノイドの原理上、トルクは吸引時に最大トルクを発生し、ストロークが伸長した場合にトルクは減少する。参考に、SSD-1864の特性を図2に示した。



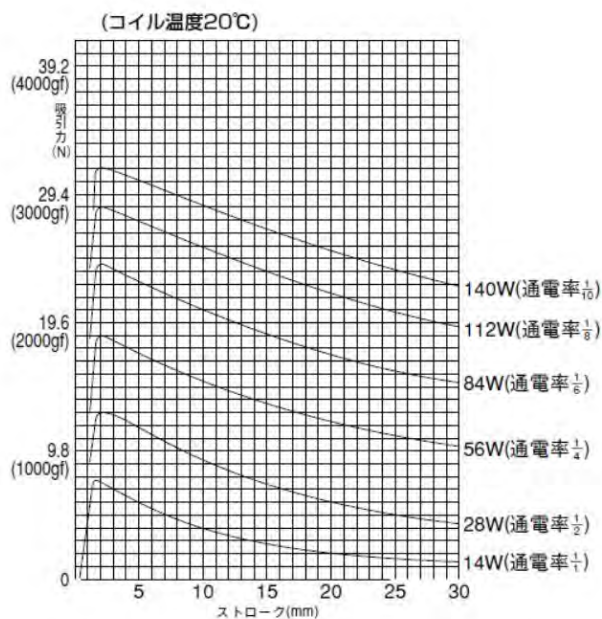


図 2. SD-1864 特性表

ユエータに機構的改良を行うことで直動の弾性特性を得る方法を検討した。

これまでのアシストスーツ開発で使用している軽量薄型アクチュエータを写真 8 に示した。

本開発品のアシストスーツはモータ 1 台のみを使用するため、比較的大型の容量が必要とされるが、薄型の減速機を用いることにより、小型化を実現した。しかし、初期開発品は重量が約 1000g とアシストスーツに搭載するには若干重いことが課題であった。本研究では、減速機にサイクロギアを採用するなどにより 40%の軽量化を実現した。

改良前後のモータを写真 8 および 9 にそれぞれ示した。また、表 2 には、特性比較を示した。



写真 8. 改良前



写真 9. 改良後

アシストスーツに使用の軽量薄型サーボアクチュエータ



競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。
<https://hojo.keirin-autorace.or.jp/>

表 2. 軽量薄型サーボアクチュエータ 特性比較

	改良前	改良後
定格電圧	22 [Vdc]	22 [Vdc]
定格回転数	71 [rpm]	60 [rpm]
定格トルク	8 [N・m]	8 [N・m]
最大回転数	80 [rpm]	67 [rpm]
最大トルク N m	32 [N・m]	25 [N・m]
バックドライブトルク	1.2 [N・m]	0.8 [N・m]
直径	110 [mm]	100 [mm]
厚み	55.6 [mm]	46.5 [mm]
重量	約 1000 [g]	約 600 [g]

開発の目標である弾性特性を得るには、一方向動作のみでなく正／逆の双方向動作が理想的である。従来のワイヤーを用いた方式では、逆動作を行うことができない。そこで、回転運動から直動動作に変換し、かつ正／逆動作の制御が可能な機構として、ラックアンドピニオンの方式を採用し試験機器の開発を実施した。写真 10 に試作機を示した。

軽量薄型サーボアクチュエータの先端部にギアを取り付け、ラックギアとの噛みあわせを行うことで、ラックギアはモータが回転する正逆いずれかの方向に直動動作する。ラックギアはスライドシャフトと併設されており、ブッシュにより低抵抗でのスライドを行うことができる。

無制御状態では、減速機の影響で、簡単に左右にスライドすることはできない。しかし、一旦制御を開始すると、0 速度制御でかつ減速機の摩擦をキャンセルするためのバイアストルクが発生し、低圧力状態を維持する。シャフト端に外部より印圧すると、ラックギアおよびシャフトはスムーズに動作できることを確認した。図 3 に始動時制御ブロック図を示した。

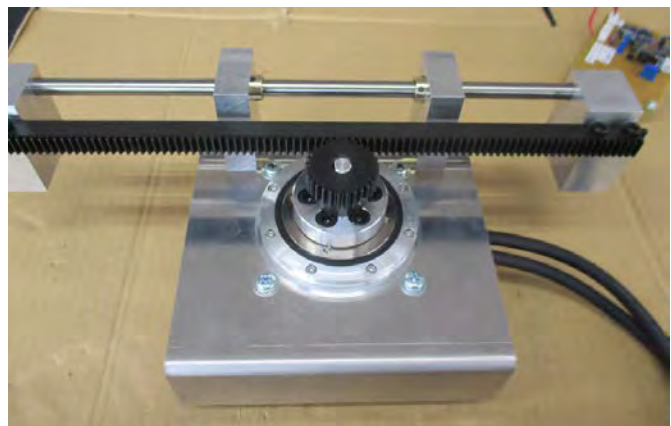
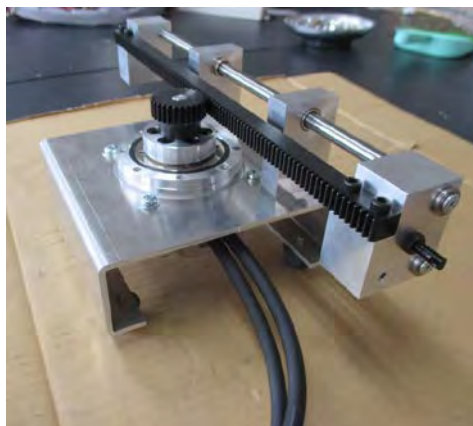


写真 10. ラックギア機構を組込んだ試作機器

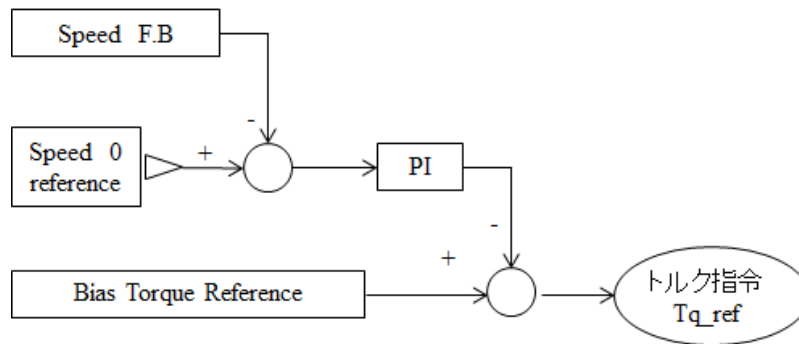


図 3 . 始動時制御ブロック図

本制御機構は、トルク制御をメインループとして、トルク信号の情報に速度関連の制御を組み込んだフィードフォワード制御である。速度制御に使用するフィードバック信号は、モータのホール素子からの信号を元に生成している。なお、モータ制御におけるトルク F.B 制御および PWM 信号生成はドライバ内で行っており、一般的な制御手法であるため、制御ブロック説明は省略する。

弾性特性としてバネを模擬したモータ制御実験を行った。図 4 には、弾性特性の試験外略図を示した。

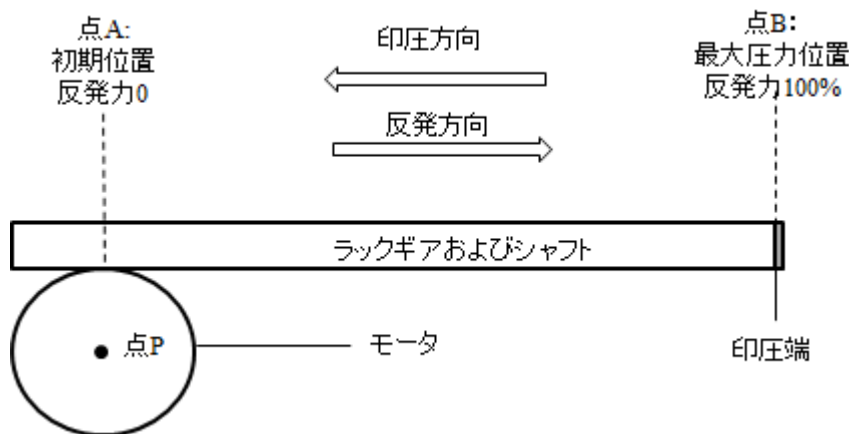


図 4 . 動作概要

図 4 より、点 A がモータの中心点 P 上に位置する場合を初期位置とする。このとき速度は 0 であるが、減速機のバックラッシュをキャンセルするためのトルクはかかっている状態である。これより、印圧端に印圧方向へ外部圧力をかけた場合、点 A は中心点 P から離れ、点 B が中心点 P に近づく。弾性の特性は点 B が移動することで、印圧方向とは逆の方向への反発力を発させる。このとき反発力は中心点 P と点 B の距離に反比例する。本研究では、これらの要素をもとに、図 5 に示す制御ブロック図を提案し、検討を行った。

図 3 の Bias Torque Reference に図 4 にある点 B の位置変化量を加算することで、反発力となるトルク信号を増大させる。位置の変化量算出および変化量を必要なトルクとして演算させる機能を付加している。ここで、弾性特性は位置により非常に変化速

度が緩やかであることから、PI 制御内における Gain は位置により変化率および Integration の変化量を可変させることで、弾性に近い制御を実現している。なお、点 B が中心点 P に到達する間の途中で位置を保持した場合、バネの反発力は一定の力を保持する。しかし、図 5 の制御ブロックでは Integration 演算が継続して実行されるため、トルク指令は増大する。その対策として位置情報をもとに Integration 出力に位置情報をもとにした可変 limit 回路を付加することで、一定トルクの出力を実現した。強さ、速度などを試験的に設定変更するため、各種 Parameter の変更を可能としている。

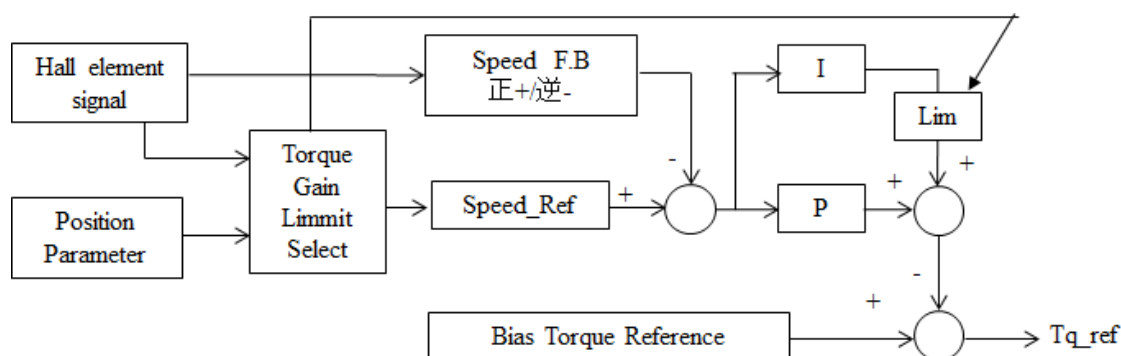


図 5. 弾性特性制御を組み込んだ制御ブロック図

○研究成果

本研究において、これまでの既存のアクチュエータから薄型軽量化を実現できた。また、ラックアンドピニオン方式の機構と組み合わせることで、小型の直動アクチュエータを開発できた。さらに、モータ制御に新たな制御理論を組み込むことにより、直動アクチュエータの弾性特性が実現でき、良好な結果が得られた。今後、アシストスーツへの組み込みを行い、人動作とアシスト動作とのマッチングを行うための最適なパラメータ選定の検証実験を継続して実施する予定である。

本研究の成果は、企業が開発するアシストスーツへ展開することにより、装着性の向上が期待される。本研究の成果であるアクチュエータの弾力特性の制御機能は、今後、筋力の低下予防などヘルスケア分野への応用も大いに期待できる。