シリンジを用いたイレウスチューブのバルーン内圧制御*

関 健 史^{*1}, 長 縄 明 大^{*1}, 岡 潔^{*2}
石 川 信 治^{*3}, 芳 野 純 治^{*4}

Control of Balloon Internal Pressure for Ileus Tube Using a Syringe

Takeshi SEKI^{*5}, Akihiro NAGANAWA, Kiyoshi OKA,
Shinji ISHIKAWA and Junji YOSHINO^{*5} Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University,
1-1 Tegatagakuen-cho, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

Recently, by development of double balloon and capsule endoscopes, small intestinal whole area observation was enabled. However, it is difficult to use these endoscopes in patients with intestinal obstruction and adhesion. We developed a new endoscope that can be used in patients with intestinal obstruction and adhesion; this instrument consists of an ileus tube and an optical fiberscope (diameter, 1.1 mm). The complete observation of small intestinal is to be planned by controlling internal pressure of balloon in ileus tube, and pulling the tube out at constant speed. In our previous study, we have developed an internal pressure control device which consists of a balloon of ileus and an industrial cylinder, and we confirmed the utility. In this study, we developed a new control device combined with a general medical syringe, which enables to be sterilized easily and also to give less anxiety to patients. As the results of performance experiment of the device, the control accuracy was within $\pm 0.5\%$ error. Furthermore, in a disturbance response, the pressure fluctuation was limited down to 12%, compared with a case without any control.

Key Words: Medical and Welfare Assistance, Mechatronics, Digital Control, Small Intestine, Ileus Tube, Balloon Internal Pressure

1. 緒 言

小腸は、ダブルバルーン内視鏡やカプセル内視鏡によって全域検査が可能となり、各種小腸疾患の診断に用いられているが、癒着や狭窄が存在するイレウス症例では、使用が制限されることが多い⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、イレウス症例の治療法として、イレウスチューブを用いた方法があり、患部の腸液や消化物をチューブ先端部の側孔より吸引して排出治療する。このチューブ内は、著者らが開発した外径 1.1 mm の極細径光ファイバースコープを通すことができるため、イレウスチューブと光ファイバースコープを組み合わせ、イレウス症例の患者にも適用できる小腸内視鏡に関する研究開発を行っている。この特徴は、イレウス症例の治療のため

に既に挿入されているチューブをそのまま用いるため、内視鏡挿入に伴う苦痛はほとんどなく、消化管穿孔や腸管損傷の危険も低いことが挙げられ、イレウス解除直後の病変部の観察や手術適用の判断などに用いることが期待されている。これまで行った臨床試験では、チューブ先端部付近の観察は可能であったが、それ以外の場所の観察はできていない⁽³⁾。

そこで、イレウスチューブのバルーン内圧を一定値に保持しながらチューブと光ファイバースコープを同時に引き抜き、挿入時に手繰り寄せられた腸管を一定の速度で開放し、チューブ先端部より口側の腸管内を観察するためのバルーン内圧制御装置を開発した⁽⁴⁾。本装置の有効性を確認するため、製作したシリコン製腸管モデル内にチューブを挿入して行った引き抜き試験により、外部圧力の影響を抑制してバルーン内圧を一定値に保持することができたため、実際の臨床でも腸管を一定の速度で開放できる可能性があることを確認した。

しかし、工業用の水圧シリンダを使用したため、シリンダ本体の滅菌性や容量過多の問題だけでなく、患

* 原稿受付 2009 年 12 月 15 日。

^{*1} 正員, 秋田大学工学資源学部 (☎ 010-8502 秋田市手形学園町 1-1)。^{*2} 正員, (独) 日本原子力研究開発機構 (☎ 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。^{*3} 秋田大学工学資源学部。^{*4} 藤田保健衛生大学坂文種徳會病院内科 (☎ 454-8509 名古屋市中川区尾頭橋 3-6-10)。

E-mail: seki@control.mech.akita-u.ac.jp

者へ不安感を与える恐れが懸念される。本研究では、医療シリンジを用いたバルーン内圧制御装置を製作し、その制御性能を検証した。

2. バルーン内圧制御装置の概要

図1にシリンジを用いたバルーン内圧制御装置を、図2にその構成を、表1に使用した主な部品の仕様を示す。イレウスチューブは、先端部に2つのバルーンを有する親水性イレウスチューブ 16 Fr(クリエイトメディック)を用いた。このチューブの前方バルーンへ滅菌蒸留水を注入するための一方弁に三方活栓を接続し、さらにシリンジと圧力センサを接続した。圧力センサは、バルーンに加わる圧力値を計測し、AD変換器を介してPC内にデータが取り込まれる。PC内では、一定の内圧値を保持するための演算が行われ、DA変換器よりモータドライバに駆動電圧を出力する。シリンジ内には、末端の円形部分がスライダと固定されたプランジャが挿入されており、PCからの指令に応じて

Fig. 1 Balloon pressure control system using a medical syringe

Fig. 2 Composition of control system

Table 1 Specification of parts

Syringe	50 [ml] (Terumo)
Sensor	XFHM-050KP (Fujikura)
DC motor	RE25 (Gearhead GP26B, Maxon)
Ball screw	BNK0801-3 (THK)
AD/DA convertor	ADA16-8/2(CB)L (Contec)

駆動されるモータとボールネジによりプランジャが動作し、バルーン内圧を加減する。実験では、バルーン内に約 10 ml の水を注入し定常圧力値が約 15 kPa となった状態を初期状態とした。

3. 制御系設計

バルーン内圧制御系の仕様は、(1) 医師が腸管把持の状態を確認しながら、定常値を変更するための目標値応答特性と、(2) 腸管内のバルーンが腸管径の変化による内圧変化や、蠕動運動などの小腸の動きに対する内圧変化を抑制し、一定の内圧値を保持するフィードバック特性が要求される。このため、条件付き 2 自由度制御系を採用した⁽⁵⁾。

制御対象のモデル $P(s)$ は、ステップ応答の波形から求めた。図3にステップ応答を示す。なお、圧力センサの測定範囲が 50 kPa までであるので、測定は 45 kPa までとした。時刻 0.2 秒からモータドライバに 0.5 V の電圧を印加し続けると、モータが一定速度で回り続けるため、時間の経過と共に圧力値は大きくなった。このため、モデル $P(s)$ を次式とした。

$$P(s) = \frac{200}{s+1.25} \cdot \frac{1}{s} \quad (1)$$

また、目標値応答特性を決定する規範モデル $F(s)$ は、本研究と並行して行っている小腸内圧計測の臨床結果(藤田保健衛生大学の倫理委員会で承認)より、過度に立ち上がり特性を速くすることなく変更するため、次式とした⁽⁶⁾。

$$F(s) = \left(\frac{1}{s+1} \right)^2 \quad (2)$$

さらに、フィードバックコントローラ $C(s)$ は、不完全微分型 PID コントローラとし、各ゲインは試行錯誤により決定した。

$$C(s) = 0.2 + \frac{0.25}{s} + \frac{0.5s}{s+10} \quad (3)$$

実験では、式(1)~(3)をサンプリング周期 50 msec で離散化して PC 上に実装した。

Fig. 3 Step response of plant

4. 制御性能の検証

4.1 目標値応答特性 図4に目標値応答の結果を示す。目標値は、時刻5秒の時、内圧変化の臨床結果を参考に15 kPaから2 kPa変化させた。図より、バルーン内圧は、規範モデルの出力にほぼ一致しており、目標値17 kPaに到達後も $\pm 0.5\%$ 以内の精度で目標圧力を保持することができた。

4.2 外乱抑制応答 図5に外乱抑制応答の結果を示す。外乱は、その大きさが臨床結果の内圧変化を参考にし、バルーンに一定荷重をステップ状に与えた。制御を行わない場合(三方活栓を切り替え、シリンジ側に内圧変化が伝達しない状態)では、最大4.22 kPa変化した。一方、シリンジを用いた制御の場合では、最大約0.5 kPaの内圧変化となり、制御を行わない場合と比べると約12%の変化となり、非常に効果的に外乱の影響が抑制された。また、 $\pm 2\%$ 以内の定常状態に戻るまでの時間は約1.5秒であり、臨床の内圧変化と比較しても、無理に抑制しようとはしておらず、良好な結果が得られた。

以上の結果より、バルーン内圧を一定値に保持することができ、一定の速度で引き抜ける可能性があることがわかった。

Fig. 4 Reference response property

Fig. 5 Disturbance refection property

5. 結 論

本研究では、イレウス症例の患者にも適用できる小腸内視鏡を開発する目的で、医療シリンジを用いたバルーン内圧制御装置を製作し、その制御性能の検証を行った。その結果、目標値応答、外乱抑制応答ともに、小腸内圧計測の臨床結果と比較考察すると、適切に制御できる結果が得られた。

謝 辞

本研究は平成19～21年度文部科学省科学技術振興調整費「光医療産業バレー拠点創出」の一環として実施したものである。関係者各位に謝意を表す。また、本システムを製作するにあたりご協力して頂いた株式会社フジクラ、およびエーテック株式会社の関係者に謝意を表す。

文 献

- (1) Yano, T. and Yamamono, H., Characteristics and Insertion Procedure of the Double Balloon Endoscopy, *The Japan Society of Coloproctology*, Vol. 60, (2007), pp.940–946.
- (2) Iddan, G., Meron, G., Glukhovsky, A. and Swain, P., Wireless capsule endoscopy, *Nature*, Vol. 405, (2000), pp.417.
- (3) Naito, T., Yoshino, J., Inui, K., Wakabayashi, T., Kobayashi, T. and Watanabe, S., Clinical Application of Ultra-small-caliber Enteroscope for Ileus, *Clinical Gastroenterology*, Vol. 23, No. 2, (2008), pp.277–280.
- (4) Seki, T., Takei, N., Naganawa, A., Oka, K., Yoshino, J., Design of balloon pressure control system for ileus tube, *Joint Conference of Engineering Applications on Wellbeing and Life Support*, (2008), pp.154.
- (5) Sugie, T. and Fujita, M., “Introduction to Feedback Control”, Corona Publishing, (1999).
- (6) Ishikawa, N., Oka, K., Naganawa, A., Yoshino, J., Wakabayashi, T., Watanabe, S. and Naito, T., Development of an Instrument System for Measuring the Internal Pressure of the Small Intestine Using an Ileus Tube, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 756, 2009, pp.2359–2362.