

マイクロ体内ロボット向け通信モジュールの構成と設計

渡邊 謙一[†] 中村 文哉[†] 斎藤 実[†] 角 隆文[‡] 山村 尚嗣[‡] 泉 知論^{††} 山内 寛紀^{††}

[†]立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

[‡]立命館大学工学部電気電子工学科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

^{††}立命館大学理工学部電子情報デザイン工学科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: [†] {re014010, ro009018, re004029}@se.ritsumeai.ac.jp, [‡] {re003033, re015032}@se.ritsumeai.ac.jp
^{††} {t-izumi, yamauchi}@se.ritsumeai.ac.jp

あらまし 体腔内を自由に移動し、情報収集・診断・治療を行う医療用マイクロ体内ロボットの中核となる組み込みコンピュータシステム(体内コンピュータ)の開発を行っている。この体内コンピュータはマイクロ体内ロボットの全体制御プロセッサ、ビデオ画像処理及びパケット通信処理を担う。マイクロ体内ロボットはワイヤレス通信での制御可能な体内滞留型医療用ロボットを指向しており、実現には極低消費電力と共に高度の安全性が求められる。本研究では、この要求を満たすための通信プロトコル、アーキテクチャを検討し、設計を行った。各々の診断・治療、さらには家畜などに応用できる汎用性・拡張性の高いシステムを目指している。

キーワード カプセル内視鏡, 体内コンピュータ, CRC 符号化, ハミング符号化

Construction and Design of the Communication Module for Micro-Capsule-Robots

Kenichi WATANABE[†] Fumiya NAKAMURA[†] Minoru SAITO[†] Takafumi KADO[†]
Notsugu YAMAMURA[‡] Tomonori IZUMI[‡] and Hironori YAMAUCHI^{††}

[†]Graduate of Science and Engineering, Ritsumeikan University 1-1-1 Noji Higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

[‡] Department of Electrical & Electronic Engineering College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji Higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

^{††} Department of VLSI System Design College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji Higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: [†] {re014010, ro009018, re004029}@se.ritsumeai.ac.jp, [‡] {re3033, re015032}@se.ritsumeai.ac.jp
^{††} {t-izumi, yamauchi}@se.ritsumeai.ac.jp

Abstract We develop a computer platform as a central system of a micro-capsule-robot, which moves freely inside a body, and gets information about the body for diagnosis. This computer platform controls all micro-capsule-robot function, and manages image compression, and the packet communication. The micro-capsule-robot is to stay in the body and be controllable by the wireless communication. Hence, extremely small power and high safety is important for realization. In this paper, we devised communication algorithm and hardware architecture to satisfy this requirement and designed it. We plan a system of the high generality and the expansion which not only each person's diagnosis and treatment but also livestock and so on can apply.

Keyword capsule fiberscope, computer platform, CRC encoder, hamming encoder

1. はじめに

近年、医療の現場において、より安全で、患者に負担をかけない検査や治療が求められている。特に内視鏡を用いた検査においては、カプセル内視鏡の開発が急速に進んでいる。^[1]2001年に欧米で認可されたカプセル内視鏡は、各国で臨床応用され、2005年末までに26万件の検査が実施されている。^[2]従来、胃や腸の検

査においては胃カメラを飲み込むことによって、内部の状態を映像として撮影し、検査に用いていた。しかし、この従来の検査法である胃カメラによるチューブ型内視鏡は、患者が検査を受ける際に、チューブを飲みこむことに伴う嘔吐や、チューブを通すことによって伴う痛みを生じるために、表面麻酔が必要である。このように、チューブ型内視鏡による検査では、患者

への負担が非常に大きかった。そこで、現在カプセル型内視鏡に注目が集まっている。カプセルからは無線による通信を用い、体に着用している受信機で撮影した画像を受信できるようになっている。つまり、カプセルを錠剤と同じように飲み込むことによって、チューブ型と同様に外部から体内の映像を確認することができる。よって、嘔吐や痛みの症状がなくなり、患者への負担が軽減される。[3]

また、今まで困難であった小腸の診断が可能になる。現在実用化されているカプセル内視鏡は、特に小腸のスクリーニング検査用として用いられている。バッテリー寿命は、飲み込んだカプセルが小腸末端に到達するまでの時間が目安となり、おおよそ8時間である。胃や大腸の診断に適用されていない理由として、現行のチューブ型内視鏡による検査がこれらの部位では確立されていることがあげられ、撮像部位の選択ができない点や、解像度と撮像枚数の少なさが指摘されている。適用部位の拡大、イメージセンサの高画素化や高フレーム化を図るためにもバッテリー寿命の改善が望まれている。[4]

そこで本研究では、カプセル内視鏡である「マイクロ体内ロボット」による低侵襲診断・治療を実現するための要素技術として、今後開発される全てのマイクロ体内ロボットに標準搭載可能となる、体内コンピュータのプラットフォーム実現を目指している。今回は低消費電力と高安全性に配慮し、今後への幅広い拡張性を持たせた体内コンピュータプラットフォームのプロトタイプを考案した。今回は、外部サーバとデータの送受信を担う通信モジュールについて説明する。このモジュールはマイクロ体内ロボットに特化しており、低消費電力、小回路規模でかつ高い安全性を求められているモジュールである。

以下第2章で体内コンピュータの概要、第3章で体内コンピュータの通信プロトコル、第4章でハードウェアアーキテクチャ、第5章で設計評価、第6章でまとめを述べる。

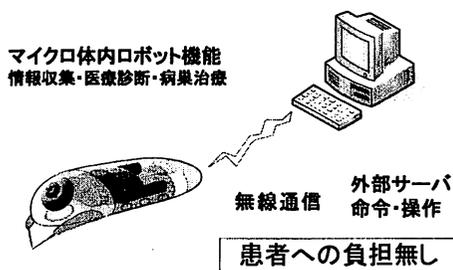


図1 マイクロ体内ロボットイメージ

2. 体内コンピュータ構成・機能

体内コンピュータとはマイクロ体内ロボットとして、マイクロ生体センサからの信号を計測・処理し、評価結果から治療・処方の指令など、治療ロボットの頭脳としての機能を受け持つ部分である。

マイクロ体内ロボットは、体内で取り扱われるため、内部にあるバッテリーのみで消費電力をまかなわれなければならない。また、マニピュレータの暴走などを起こさせないように体内コンピュータは制御していかなければならない。よってこの体内コンピュータとしては以下のような要求を求められる。

- 極低消費電力化、回路の小回路規模
- 高度の安全性と信頼性

この要求は、例えば安全性を配慮して、通信モジュールに高機能なエラー訂正モジュールを設けると、それだけ消費電力も増え、回路規模も増えてしまう。このように、この要求は相反することであり、バランスよく設計することが大事である。

2.1. 体内コンピュータ概要

体内コンピュータにはマイクロプロセッサ(MPU)、通信モジュール(I/O)で構成され、さらに撮像機能や各種センサ機能(温度センサ、圧力センサ等)、各種ドライバ機能(移動用または治療用)などを目的に応じて、複数拡張搭載できる仕様としている。

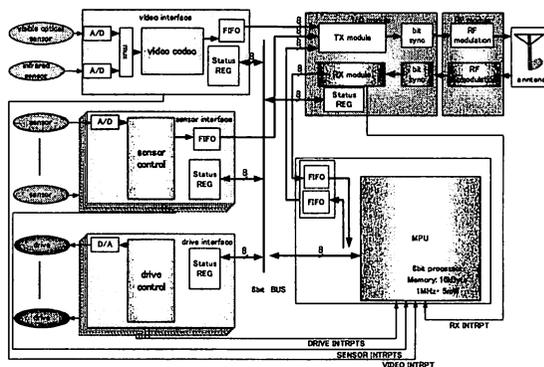


図2 体内コンピュータ概要図

2.2. 体内コンピュータ機能

体内コンピュータへの命令は外部サーバから無線通信を介し、データの送受信を行う。そして体内コンピュータは送受信データに付加するヘッダハンドルの処理を通信モジュール部で行う。また、ビデオやセンサから得る計測データはMPUを経由せず、直接通信モジュールに送られる。そのため、データのやりとりは共通バスを使わずに、専用線を使う。これらは、MPU

での処理負担を抑え、MPU の機能を特定することで回路規模削減、また起動時間を減らすことで低消費電力化の目的を持つ。

2.3. 制御用データバス構成

MPU から各モジュールへの制御は各モジュールのもつステータスレジスタにパラメータを書き込むことで行う。これらステータスレジスタは MPU のデータメモリと共用のバスで接続されており、全て MPU からメモリマップされている。そのため各パラメータの読み書きはメモリへのアクセス方法と同様に行える。制御機能を統一することにより、回路規模の削減と高拡張性を実現する。

また、各モジュールからは MPU に対し専用の割込み信号線を持ち、必要に応じて MPU に割込みをかけることが可能である。

2.4. 待機モード遷移機能

この体内コンピュータは、長期体内滞留要求とマイクロ体内ロボットサイズ制約によるバッテリーや発電力の限界^{[5][6][7]}から、低消費電力を実現するため通常を待機モードとしている。動作必要時(処理モード)以外はこのモードへ自動的に遷移することで、低消費電飾を実現している。MPU がモード遷移の管理を行い、ない外部からの処理命令が無いことを判断すると、搭載するクロック調整器を制御し各モジュールに対するクロックを停止又は低速化させ、待機状態を実現する。待機モード時は全ての割込みに対して常に受付可能であり、内外部からの割込みにより処理モードに遷移する。

3. 体内コンピュータ通信プロトコル

マイクロ体内ロボットの通信プロトコルでは、低消費電力化が求められる。また、医療用という観点からリアルタイム性・送受信データの確実性が求められる。そのため、体内コンピュータ専用のプロトコルとして計算負荷・通信負荷を抑え、送受信データを確実かつ能率的に移すことを目的としている。

通信はサーバ主導であり、マイクロ体内ロボットに搭載されるビデオモジュール・センサの動作パラメータは外部サーバから送信される制御データにより設定される。またマイクロ体内ロボットからは、外部サーバからの制御データに対する応答やビデオ・センサモジュールからのデータが送信される。図3に体内コンピュータの通信プロトコル構成を示す。

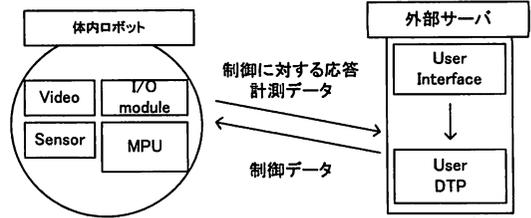


図3 通信プロトコル構成図

本データ通信では、計測データおよび制御命令はパケットとよばれる単位に分割し、送受信される。その際、送受信パケットの同期はフレーム同期方式を使用する。

また、本データ通信では医療用という観点と無線による体内外通信という特殊な方式をとるため、制御には高度の安全性が求められる。この要求を満たすため、送信データのヘッダ部とペイロード部に対してエラー検出コード(CRC-8)の付加とエラー訂正コード(ハミング符号)の付加を行う。CRC-8は8ビットの検出コードを付加することで、高精度なエラー検出が可能になる。

ハミング符号では、データ4ビットに対して3ビットの検査コードを付加することで1ビットのエラーを訂正できる特性を持つ。エラー検出・訂正コードを組み合わせで付加することで単一エラーに対して訂正可能、バーストエラーに対し非常に高精度なエラー検出が可能である。^[8]

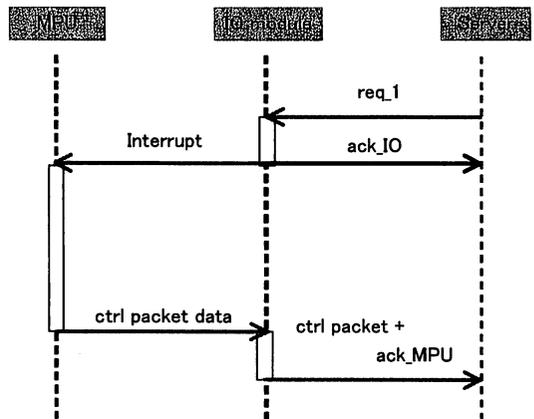


図4 サーバからの命令シーケンス

さらに安全性追求の手段として、外部サーバからの制御データ(req)に対し、通信が正常に行われたことを示す応答(ack)の返答を随時行う。外部サーバはackを受信することで制御完了の確認をとる。そのためackが一定時間経過しても受信されない場合、reqの再送を行い、送受信エラーを回避する。その際、体内ロボ

ット側ではパケットヘッダ内に含まれる req の番号を管理することで、再送された命令を重複して実行されることを回避し、ack の再送を行う。

4. ハードウェアアーキテクチャ

低消費電力を狙う目的から、レジスタを極力使わないことを目指した。そのため、送信側、受信側入出力はもちろん、内部にもメモリや FIFO などのバッファは一切使わずに設計した。

4.1. 送信モジュール(Tx モジュール)

4.1.1. 処理概要

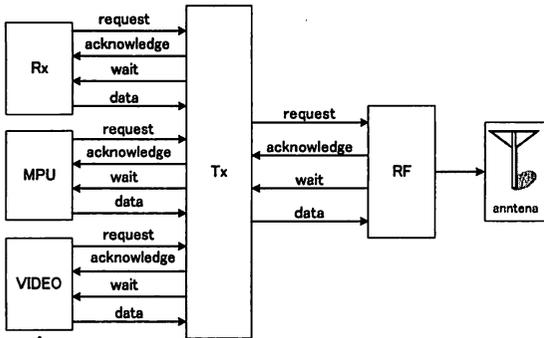


図5 MPU や各種モジュールおよび Rx とのハンドシェイク

送信モジュール(以下 Tx)は、体内コンピュータ内の MPU や撮像機能モジュールなどの各種機能モジュールからデータを入力し、RF モジュールにビット列を出力するモジュールである。ここではデータをパケット化、すなわちヘッダを生成・付加し、MPU や各機能モジュールからのデータ入力要求信号を選択するアービトラージョン化を行い、エラー検出のための CRC、エラー訂正のための Hamming 符号を生成・付加し、またビット同期のためのビットパターンも付加する。なお体内コンピュータ内の各種モジュールから同時にデータ入力要求が起こった場合は、固定で不変の優先順位をもってこれを制御する。また受信モジュールからパケットヘッダを受け取り、そのアックノリッジパケットを生成し、制御パケットに対する受領通知を外部のサーバに送出する。

4.1.2. 全体構成

図6にTxの全体構成を示す。

入力されるデータは8bitであり、req/ack ハンドシェイクを行った後、データ入力を始める。データの入力中、Txの都合、又はRFモジュールの都合でデータが

入力できなくなった場合は wait 信号でデータ入力を停止させることができる。

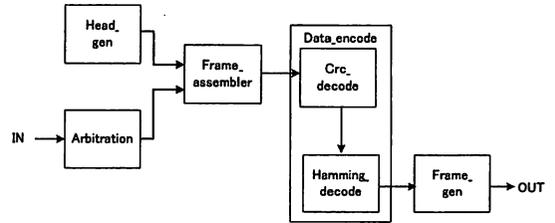


図6 Txの全体構成図

4.1.3. 各ブロックの概要

Arbitration モジュールでは、各モジュールからのデータ送信要求の選別を行うモジュールである。各モジュールには優先順位を設けてあり、体内コンピュータからは、画像データのような送信に時間のかかるデータもあれば、緊急性の高いデータもある。緊急性の高いデータを出力するモジュールは、限られているので、そのモジュールを優先的に選択し、データ送信要求を受け付ける。

Head_gen モジュールは、各パケットのヘッダデータを構築するモジュールである。ヘッダにはカプセル固有の ID、送信元のモジュール番号、データサイズなどが格納されている。

Frame_assembler モジュールでは、パケットを組み立てるモジュールである。また、出力はシリアル転送であるため、ここで同時にパラレル/シリアル変換を行う。

Data_encode は Crc_enc, Hamming_enc モジュールから構成される。Crc_enc モジュールは CRC-8 符号化を行うモジュールである。データを 1bit ずつ入力し CRC 計算をしながらデータ出力を行い、最後のデータの後ろに CRC 符号を付加する。Hamming_enc モジュールでは、ハミング符号化を行うモジュールである。CRC 符号化を行ったデータに対し、さらに 4bit につき、3bit のハミング符号を付加する。CRC-8、ハミング符号共に、ヘッダデータは符号化するが、ペイロードデータは任意である。

Frame_gen モジュールでは、同期フラグを生成しデータの前のつけ、パケットデータを構築する。

4.2. 受信モジュール(Rx モジュール)

4.2.1. 処理概要

受信モジュール(以下 Rx)は RF モジュールからビット列を受け取り、体内コンピュータ内の MPU に通信データを渡す。ここでは、ビット列中のパケット開始位置を検出するためのビット同期、エラー検出のための CRC コード、エラー訂正のためのハミング符号、及

びヘッダ解析を行い、このマイクロ体内ロボット宛の正常なパケットのみを MPU に渡す。

また、受け取ったパケットがこのマイクロ体内ロボット宛の正常なパケットと判断された場合、Tx に対して、制御パケットに対する受領通知を生成するためのデータ送信要求信号を出力する。

MPU、及び Tx とのデータ出力はハンドシェイク (req/ack) を行う。

また、Rx にはバッファメモリを搭載せずに受信処理を行うことにより、小回路規模を実現する。そのため、CRC コードの解析結果が確定する前に MPU 側にデータを出力している。そこで、1 パケット分のデータを受信・出力し終わると、そのデータが正常であったかどうかを MPU 側に通知することによって、エラーのあるデータが MPU 側で処理されることを防止する。

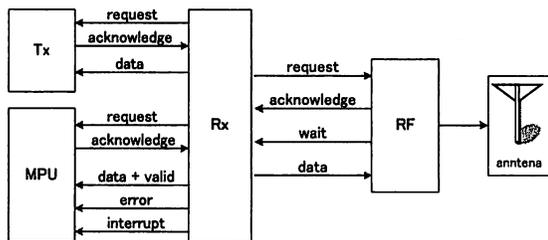


図 7 MPU 及び Tx モジュールとのハンドシェイク

4.2.2. 全体構成

図 8 に全体構成を示す。

入力されるデータは 1bit であり、データの有効告知信号 (valid) と共に入力される。入力データの先頭には同期 bit が付加されており、Rx は同期 bit を検出すると MPU 側にリクエストを送信し、処理されたデータから順次、有効告知信号と共に出力される。

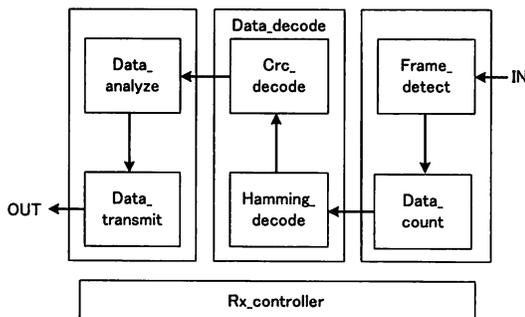


図 8 Rx モジュールの全体構成

4.2.3. 各ブロックの概要

SYNC_BLOCK は、Frame_detect モジュールと

Data_count モジュールから構成される。

Frame_detect モジュールでは、同期 bit を検出、及び Tx モジュールで付加された 0 挿入を排除する機能を持つ。同期 bit を検出すると、パケットの開始を示す信号を出力する。

Data_count モジュールでは、パケットのヘッダとペイロードのデータ数をカウントし、それぞれの終了を知られる信号を出力する。受信パケットは可変長であるため、ペイロードのデータサイズは後述の Data_analyze モジュールから入力される。ヘッダサイズについては、拡張性を実現するため、外部から入力されるものとし、ヘッダサイズが変更されても対応可能となっている。また、終了を知らせる信号は以降のモジュールに伝播させるものとする。

Decode_Block は Hamming_decode モジュールと Crc_decode モジュールから構成される。

Hamming_decode モジュールでは、ハミング符号の解読を行い、エラーが発見され、訂正可能であれば訂正してデータ出力する。

Crc_decode モジュールでは、入力されたデータに対する CRC コードを解読し、その結果を出力する。解読はヘッダ、およびペイロードの両方で実行され、それぞれの結果は終了を知らせる信号と共に出力される。

Transmission_BLOCK は、Data_analyze モジュールと Data_transmit モジュールから構成される。

Data_analyze モジュールでは、入力データにおけるヘッダ部分の保存、及びパケットデータが正常か動かを判定し、その結果を出力する。ヘッダ内部にはカプセル ID と呼ばれる識別番号が含まれており、I/O モジュールが保持するカプセル ID と一致するかどうか判定する。カプセル ID 判定結果と CRC コード解読結果によりパケットデータが正常であるかどうかを判断する。

Data_transmit モジュールでは、MPU、及び Tx モジュールとのデータの出力を行う。パケットの開始を示す信号が入力されると MPU 側にリクエスト信号を出力し、ペイロードデータの出力が終了するかデータが異常であると判断されると、リクエスト信号を取り下げる。このとき、異常であればエラーであることを通知し、正常であれば割込み信号を出力し、Tx モジュールにリクエスト信号を出力する。

5. 設計

今回の設計は今後の仕様変更、拡張を考慮して行った。今後は RF モジュールと接続してプロトタイプ実験を行うが、そこでの評価で通信プロトコルの仕様変

更がしばしば起こることが予想される。また、将来的に各種センサ機能(温度センサ, 圧力センサ等)などと接続されることが決まっている。

そのための方針として以下のことを念頭において設計を行った。

- 機能ごとのモジュール分割を行い、モジュール度を高めた
- 内部モジュール同士のインターフェイスを簡素化する
- 例外ルールを極力作らない
- 拡張に合わせて、接続ポートを作成する

上の3点については、アーキテクチャの柔軟性を、下の1点に対しては拡張性を考えての方針である。

仕様変更に対応するには、モジュール度を高めることも大事であるが、インターフェイスを簡素化することも重要である。モジュールを切り離し、新しいモジュールと接続する際にインターフェイスが簡素化してあると、非常に楽である。また、例外ルールを作らないことも重要で、アーキテクチャがよりわかりやすくなる。

また、通信モジュールと接続できる各種機能モジュールは最大13個であり、将来性を考えて、13個分の拡張ポート準備した。

6. まとめ

マイクロ体内ロボットに向けた通信プロトコルの考案とハードウェアアーキテクチャの構成と設計について報告した。通信プロトコルでは、高信頼性と低消費電力化を要求されていたため、この相反する2つの要求を満たすためにエラー検出・訂正においてCRC-8とHamming符号を用いた。またハードウェアアーキテクチャでは、将来の仕様変更のために柔軟度と拡張度の高いハードウェアが求められた。そのためモジュール度の高く、また簡素なインターフェイスになるように努めたが、同時にこれを行ったがために、シミュレーション上でのデバッグが容易に行われることもわかった。これは、モジュール度が高いためどのモジュールでのバグであるかを、容易に見つけることができるためである。今後はFPGAに実装しての実機検証を行うと同時に、MPUや各種機能またRFモジュールと接続しての評価実験を進め、より優れた通信プロトコル、ハードウェアアーキテクチャを検討していく必要がある。

謝 辞

本研究開発は、文部科学省 都市エリア産学官連携促進事業である「診断・治療のためのマイクロ体内ロボットの開発」の一部として遂行されたものである。

また、設計ならびに設計技術についてご指導ご支援いただいている立命館大学 小倉武 教授、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社 加藤俊之氏に感謝申し上げる。最先端技術の研究開発に携わる機会を頂き、関係各位に感謝申し上げます。

文 献

- [1] <http://www.shigaplaza.or.jp/area/>
- [2] <http://www.givenimaging.com/Cultures/en-US/given/english>
- [3] 山口真和, 春山真一郎, 中川正雄, “可視光通信を利用したカプセル型内視鏡の検討” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, no.43, pp.97-102, May.2006.
- [4] 伊藤真也, 川人祥二, “カプセル内視鏡用ワンチップ CMOS カメラの試作と評価” 静岡大学大学院電子化学研究科研究報告, no.27, pp.67-74, March.2006.
- [5] Y.Kado, Y.Matsuya, S.Mutoh, J.Terada, H.Morisawa, Y.Sato, T.Douseki and H.Kyurag, NTT Microsystem Integration Laboratories, “Ultralow-power CMOS/SOI Circuit Technology for Ubiquitous Communications”, Extended Abstracts for the 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, pp.746-747, 2003.
- [6] Kenichi Okada, Tomohiro Yamada, Takumi Uezono, Kazuya Masu, Akio Oki, and Yasuhiro Horiike “in-vivo Wireless Communication System for Bio MEMS Sensors”, International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.366-367, Sept.2004.
- [7] 江藤良純, 金子敏信, 誤り訂正符号とその応用, (社)テレビジョン学会(編), オーム社, 東京, 1996.
- [8] 坂井田稔, 豊留直樹, 泉知論, 山内寛紀, 来見良誠, “マイクロ体内ロボット搭載に適した極低演算ビデオ圧縮アルゴリズムの提案” 映像情報メディア学会誌, vol160, no.7, pp.1114-1118, May.2006.