

平成 17 年度 修士論文

無線センサモジュールを用いた 運動計測に関する研究

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報ネットワーク学専攻

ヒューマンインターフェース学講座

0451017 繁原大輔

指導教員

阪口 豊

出澤 正徳

岩舘 祐一

平成 18 年 1 月 31 日提出

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	論文の構成	3
第2章	無線データ収集システム	4
2.1	無線データ収集システムについて	4
2.2	本研究での無線データ収集システム	6
第3章	無線センサモジュールを用いた 表面筋電位計測装置の試作	9
3.1	背景と目的	9
3.2	表面筋電位計測について	10
3.2.1	表面筋電位	10
3.2.2	表面筋電位図	10
3.2.3	表面筋電位計測装置	11
3.2.4	表面筋電位計測における問題の解決方法	14
3.3	システムの概要	14
3.3.1	システムの構成	14
3.3.2	無線ボード	16
3.3.3	増幅回路	17
3.3.4	不関電極について	19
3.4	試作したシステムによる計測	20
3.4.1	計測内容	20
3.4.2	計測結果	22

3.5	考察	2 5
第4章	ボールの向き推定システムの試作	2 6
4.1	背景と目的	2 6
4.2	原理	2 7
4.2.1	空間での物体記述	2 7
4.2.2	ボールの向き推定原理	2 8
4.3	数値実験	3 0
4.3.1	アルゴリズム	3 0
4.3.2	数値実験の結果	3 2
4.4	ボール計測システムの試作概要	3 4
4.4.1	実験システムの構成	3 4
4.4.2	使用するセンサ	3 5
4.4.3	センサインターフェース回路	3 5
4.5	試作したシステムによる計測	3 8
4.6	実測データによるボールの向きの推定	4 0
4.6	考察	4 0
第5章	結論	4 1
参考文献		4 2
謝辞		4 4
付録		
A.	ボールの回転推定原理（数値計算）	4 5
B.	無線ボードの通信評価実験	4 7

第 1 章 序論

1.1 研究の背景と目的

現在, 様々な手法により運動計測が行なわれている. その手法の一例として, 表面筋電位計測を紹介する. 現在, 使用されている表面筋電位計測の多くは有線のシステムを使用しており, それにともなう問題点がいくつか存在する.

例えばコードによって被験者の自由な動きが制限されたり, 計測を行なう状況も制限されたりする. この問題により, スポーツ時などの実践的な場面での筋電位計測を行なうのは非常に困難である. また, ケーブルがノイズの発生源となり計測の妨げとなる場合もある.

これらの問題点の解決方法として, より良いシステムとするためには無線技術を用いて表面筋電位計測を行なうことができれば良いと考えた. そうすることで被験者は自由な動きが可能となり様々な状況での筋電位計測が行なえるだろう.

これは表面筋電位計測に限らず, 運動計測システム全般において同様の問題と解決方法が当てはまる. そこで, これを実現すべく無線技術について調査した.

近年, 無線技術には様々な方式が存在し, 実際に我々の身の周りにおいても, それらの技術を使った製品である携帯電話, 家庭用無線 LAN, モバイルコンピュ

ーディングなどが普及している．さらにこれらの無線技術を応用した無線を用いてデータ収集を行なうシステムも多く存在する．その応用例としては環境計測，ホームセキュリティ，ビルオートメーションなどがある．この様に現在使用されている無線データ収集システムは主に環境系に対しての利用が多い．それに対して本研究での利用法はより人間に近い側での応用である．その際に必要とする特徴として無線送信機を含めた各センサシステムが小型であることが必要である．その点において，現在の無線データ収集システムは端末の小型化が進み，それを満たしている．そこで，これらに使用されている無線センサモジュールを本研究で目指す運動計測システムに活かせると考えた．これにより，各観測点から直接データを無線送信することでケーブルの除去が可能となる．また，被験者は拘束されることなく，ノイズに悩まされることもなくなる．そして，今までは困難であった状況においても運動計測を行なえるようになる．このような無線センサモジュールを用いた運動計測システムを試作することを本研究の目的のひとつとした．具体的には先に述べた表面筋電位計測の無線化を試みた．

本研究での無線データ収集システムの利用法は，現在のシステムの観点から見ると，環境系に対して利用するのではなく，人間に近い所で使用することになる．これは今までは利用が少なかった面での活かし方となる．

そこで，さらなる利用法として人が扱う道具側に無線センサモジュールを埋め込み，道具の内部から情報を得ることを考えた．具体的には，ボールの内部に無線センサモジュールを埋め込み，その情報から宙に浮くボールの向きの推定を行なうアプリケーションの開発を試みた．これによりスポーツ時などに人と道具の両方から情報を得ることができれば，運動計測において非常に有効な発展となるだろう．また，これらが可能となれば，今まで知ることができな

った側面からスポーツ分野の研究を行なうことができるだろう．そのシステム実現の可能性を示すことも本研究の目的である．

1.2 論文の構成

ここで，本論文の構成について説明する．まず第2章で現在の無線データ収集システムについて説明し，それに対する本研究における利用法を述べる．第3章では無線センサモジュールを用いた表面筋電位計測システムの試作について述べる．第4章ではボールの向きを推定するアプリケーションの試作を行なった結果について述べる．第5章では結論を述べる．

第2章 無線データ収集システム

2.1 無線データ収集システムについて

現在、無線を用いたデータ収集システムには様々なものが存在する．ここで、そのイメージをつかんでもらうために、その一例としてスマートダストについて紹介する．

スマートダストとはワイヤレスの通信機器を搭載した小型で安価な「モート（粒）」と呼ばれる小型センサである．このセンサ基本は、周囲の明るさと温度を測定する．そして、これらの情報を管理用の中央コンピュータシステムにワイヤレスで送り返すようにプログラムされている．また、多数のモートを互いに近づけると、自動的にネットワークを形成する．モートは大量生産すれば非常に安く製造でき、オフィスビルや家のいたるところに塗り込むことができる．オフィスビルの各部屋に明るさと温度を感知するモートが何百、何千と埋め込まれ、それらすべてが建物のエネルギー使用情報を中央コンピュータに伝送する．これにより、エネルギーがどのように使われて、どのような節約策を採ることができるか研究できる．米国では、ビルの温度管理や、照明、電気機器の費用がエネルギーコスト全体の 3 分の 1 を占めており、スマートダストにより有効なエネルギー計画の立案が期待されている．

このように無線データ収集システムはセンサにより何らかの情報を集め、そ

のデータを無線で伝送し管理コンピュータで収集するものである。その利用法はセンサに起因したものとなる。そこで、センサが感知できる情報を以下の表 2-1 にまとめた。また、調査した無線データ収集システムの利用例を表 2-2 に示す。

種類	感知する情報の例
環境	温度、湿度、降雨量、音 など
状況	位置、高度、速度、加速度、傾き、重量、圧力、振動、衝撃 など
識別	バーコード、IC タグ、指紋、静脈パターン など
特定	ガス漏れ、煙、炎、熱、放射、科学物質 など

表 2-1. センサが感知する情報の例

分野	利用例
業務	自動検針（電気、ガス、水道） 農作物育成環境最適化
施設管理	エネルギー需要最適化（室温管理など） 構造物管理（損傷、劣化の把握）
環境	環境モニタリング 地球観測
保険・医療・福祉	見守り（安否確認） リアルタイムモニタリング（生体データ収集・管理）
交通	交通制御（渋滞解消、環境改善、緊急車両優先） 事故回避
安全、防災	ホームセキュリティ（火災、防犯、緊急通報） 被災状況把握、被災者状況把握

表 2-2. 無線収集システムの利用例

表 2-2 を見ると現在使用されている利用法はスマートダストと同様に環境系に対してのことが多い。その理由として、配線が困難な広い範囲にセンサを配置し総合的な情報を得ることで、従来よりも労力やコストを削減でき、正確な

情報を得ることが可能となるからである。また、建物内での利用は複雑な配線からの解放と初期工事やメンテナンスが楽となることから、経費削減効果、省エネ効果などの期待による[3]。

2.2 本研究での無線データ収集システム

無線データ収集システムの従来の利用法が環境系に対するものが多いことに対して、本研究では、より人間に近い所で利用することを考えた。その具体的な利用法として運動計測への利用を考えた。無線センサモジュールを体に張り付け運動を行う際の人体に起こる情報を得るようなシステムを想像してもらいたい。これは従来の保険・医療・福祉分野におけるリアルタイムモニタリングに近い利用法である（表 2-2 参照）。その一例として現在開発されている製品を紹介する。

（株）日立製作所により開発された製品で脈拍センサと加速度センサ、無線通信用のアンテナ、電池のすべてを、縦 6cm×横 4cm×厚さ 1.5cm の腕時計型のケースに実装している。この腕時計型センサノードを利用することで、装着している人の脈拍や動きなどの情報をネットワークを通じて継続的に計測する。その結果を屋内に設置した無線基地局に送信し、ネットワークを介してサーバーに蓄積したり、離れた場所でモニタリングしたりすることが可能となる。そのため、高齢者向けの住宅における生活見守りサービスや、ヘルスケアケープスでの活用を見込んでいる。

本研究で考えるシステムにおいては、このような無線センサモジュールの利用法を多数のセンサにおいて行なうことになる。その点を考えると、新たな無線データ収集システムの利用法と言えるのではないだろうか。そこで求められ

る特徴として配線がなくなることに加えて、無線送信機を含んだ各センサが小型であることが必要となる。これは先に述べたスマートダストでもそうだが、現在利用されている無線データ収集システムにおいても求められる特徴であり、様々な研究がなされている。それにともない、最近では 500 円玉サイズの無線モジュールも市販されている。将来的にはスマートダストのように小型な無線モジュールがセンサを問わず使用できるようになるだろう。それらを見越して、現在市販されている無線通信用のデモキットを使用して、研究を行った。

具体的には表面筋電位計測における無線データ収集システムの試作を行い評価した。そして、無線を用いた運動計測の有効性、可能性を示した。

また、さらなる運動計測における無線の利用法として、人間が使う道具の中に無線センサモジュールを埋め込み、道具の内部から情報を得るアプリケーションを作成した。具体的には無線でなければ測れない宙を浮く物として、ボールの向きの推定を目標とした。ここで、それに類似する製品が存在したので紹介する。

以下の図 2-1 に示したのは米 Smart Swing 社の「Intelligent Club」の概観である。この製品はゴルフクラブをスイングした際の速度と加速度、スイング面を分析する精密機械が内蔵されている。また、その情報を無線でパソコンへ伝送できる[5]。

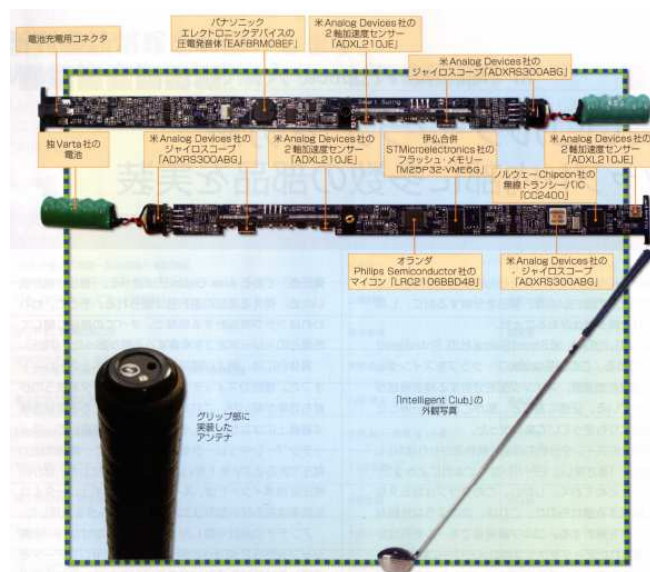


図 2-1. 電子回路を内蔵するゴルフクラブ

この製品のように外部から見ただけではわからない、振動などをリアルに感知した情報を道具側から直接得られることは、運動計測の新たな発展となるだろう。

第3章 無線センサモジュールを用いた 表面筋電位計測装置の試作

3.1 背景と目的

現在様々な手法により人体について計測する研究が行われている．その中の手法の一つで筋電位を計測して運動指令を解析したり，これを応用して義手を制御したりする研究などが行われている．しかし，現在使われている筋電位計測システムの多くは人体に装着したセンサの出力をケーブルで経由して収集しているため，被験者の自由な動きを制限してしまっている．より自然な形で人間の動きを計測するためには，無線システムを用いてセンサデータを収集することが有効である．ケーブルを介したアナログ信号伝送は，伝送過程で外部からのノイズの混入が生じやすい．この問題は観測点ですぐに信号を増幅すると共に，A/D 変換によりデジタル信号に変化したのち，無線伝送することによって防ぐことができる．そこで本研究では無線データ収集システムに使われる無線センサモジュールを使用した表面筋電位計測システムを試作，評価することによりその有効性と可能性を評価した．

3.2 表面筋電位計測について

3.2.1 表面筋電位

本研究の目的は筋電位情報自体の解析ではないが、その概要を簡単に説明する。運動神経が興奮すると、神経接合部を介して筋繊維に伝わり活動電位を生じさせる。その結果、筋小胞体から放出されるカルシウムイオンが筋収縮の引き金となる。この筋の活動電位は、導電対である体組織を介して体表面からも観察される。これを皮膚表面に固定した電極（表面電極）で捉えたものが表面筋電位である。

3.2.2 表面筋電位図

表面筋電位は筋から離れたところで電気現象を観察することになるので、無数の運動単位のリズム活動が時間的空間的に加算された筋全体の総合的な活動状態を観察することになる。運動単位のリズム活動はほんの数ミリ秒しか持続しないパルスのような電位である。しかし、表面電極で検出される表面筋電位は、多数の運動単位が種々の頻度で発生し加算された干渉波なので、連続的に発生する雑音のような電位となる。その平均電位は数 μV ～数 mV 程度、周波数成分は数 Hz ～数 100kHz 程度である。表面筋電位図の例を図 3-1 に示す。図 3-1 はひざの屈伸運動を行う際の腓腹筋（ふくらはぎの筋肉）に起こる表面筋電位を計測したものである。サンプリングレートは 500Hz で計測した。中央に見られるパルス状の波が筋肉を動かした際に観察され、収縮が生じたことがわかる。

全体的に見られる細かな振動成分は商用電源の周波数である 50Hz の波である。

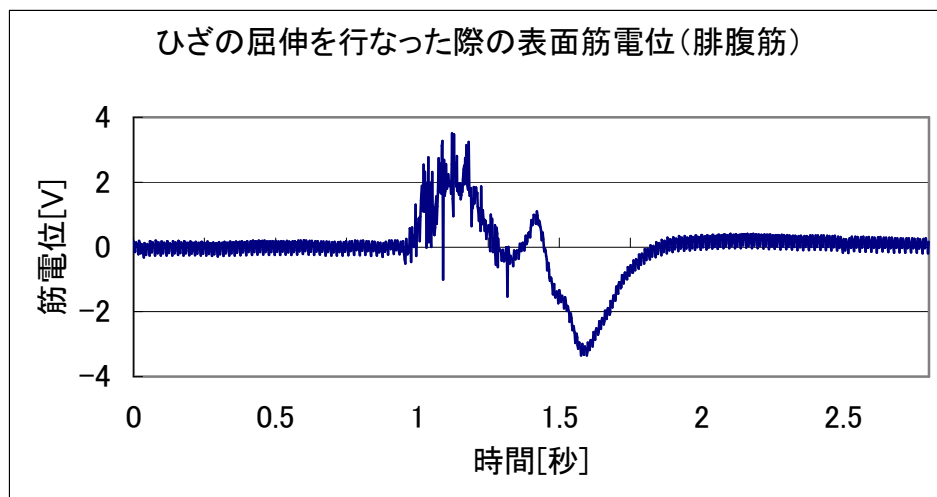


図 3-1. 表面筋電位図の例

3.2.3 表面筋電位計測装置

現在，一般的に使用されている例として，本研究室で使用している表面筋電位計測装置の概要を説明する．一対の銀塩化銀（Ag-Agcl）表面電極（Disposable Electrodes G210C，日本光電）と基準電位となる不関電極を用いて表面筋電位を双極誘導し，生体アンプ（Bioelectric Amplifier AB-621G，日本光電）で 1000 倍に差動増幅した筋電位信号を PC で 1000Hz, 12bit でサンプリングしている．

図 3-2 に表面筋電位計測の様子示す．

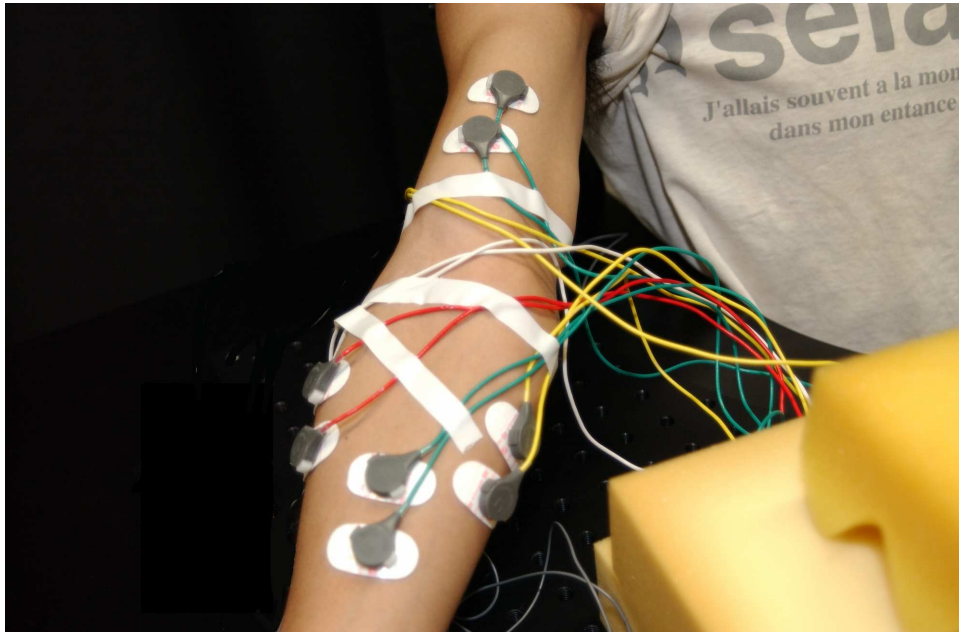


図 3-2. 表面筋電位計測の様子

図 3-2 を見るとわかるように、個々の表面電極ごとに検出した表面電位を伝送するためのケーブルが必要であり、このため次のような問題が発生する。

1. 被験者の自由な動きを制限する
2. 電磁ノイズの影響を受けやすい

1 については、ケーブルが体表面をはうことによるものと、までの配線によるものの 2 つがある。前者については運動を行う際にケーブルが邪魔して動きに変化が生じる可能性があるほか、全身による激しい運動ではケーブルに無理な力が加わる可能性が高い。後者により広い範囲で動き回る運動、回転する運動などの計測は行なうことができない。これらの原因により、実践的なスポーツを行なう際の表面筋電位計測を行なうことは、現在の装置では非常に困難である。

現段階ですでに無線伝送を使った表面筋電位計測装置は市販されている．その仕様は被験者の体に装着した無線送信機に電極からケーブル，アンプを介して信号を送り，まとめてデジタル無線伝送を行う．この様なシステムでは体表面をばうケーブルは従来のシステムと変わらず，問題を全て解決できたわけではない．

2 については電極から増幅器に至る過程で余計なノイズが混入してしまう．図 3-3 に何もしていない状態（筋肉を動かさない）でコードを揺らした波形を示す．反応を示すことが確認できる．実際の計測を行う際はコードをテープで体表面に固定するなどの対策を行っているが，ノイズの影響は完全には避けられない．

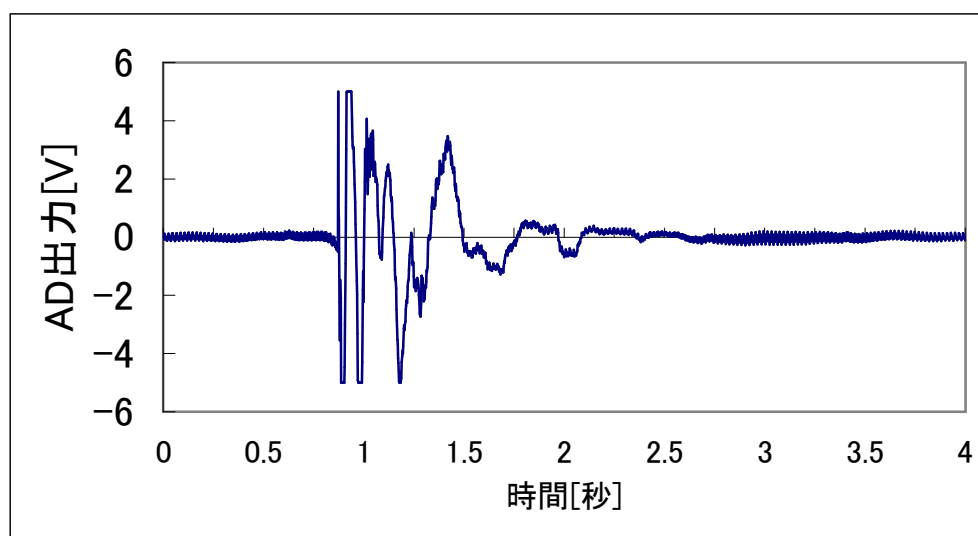


図 3-3. コードを揺らした際の出力波形

3.2.4 表面筋電位計測における問題の解決方法

無線データ収集システムを使うことで上記の2つの問題は解決できる。問題点1については無線の最大のメリットである物理的拘束からの開放により、被験者は自由な動きが可能となる。

問題点2については計測点に増幅回路と A/D 変換回路と無線送信機を取り付け、筋電位を取得したその場で増幅し、アナログ信号からデジタル信号に変換することによりノイズが乗ること防ぐことができる。

これらを満たすシステムを目標として、実際に無線を用いた表面筋電位計測システムを作成した。

3.3 システムの概要

3.3.1 システムの構成

本研究で試作した表面筋電位システムの概要を説明する。このシステムは電極と一緒に増幅器、A/D 変換器、無線送信機を被験者の体表面に貼り付け、観測点からデジタル無線でデータを送信し、PC 側に接続された受信機によりデータを受け収集する。システム構成のブロック図を図 3-4 に示す。

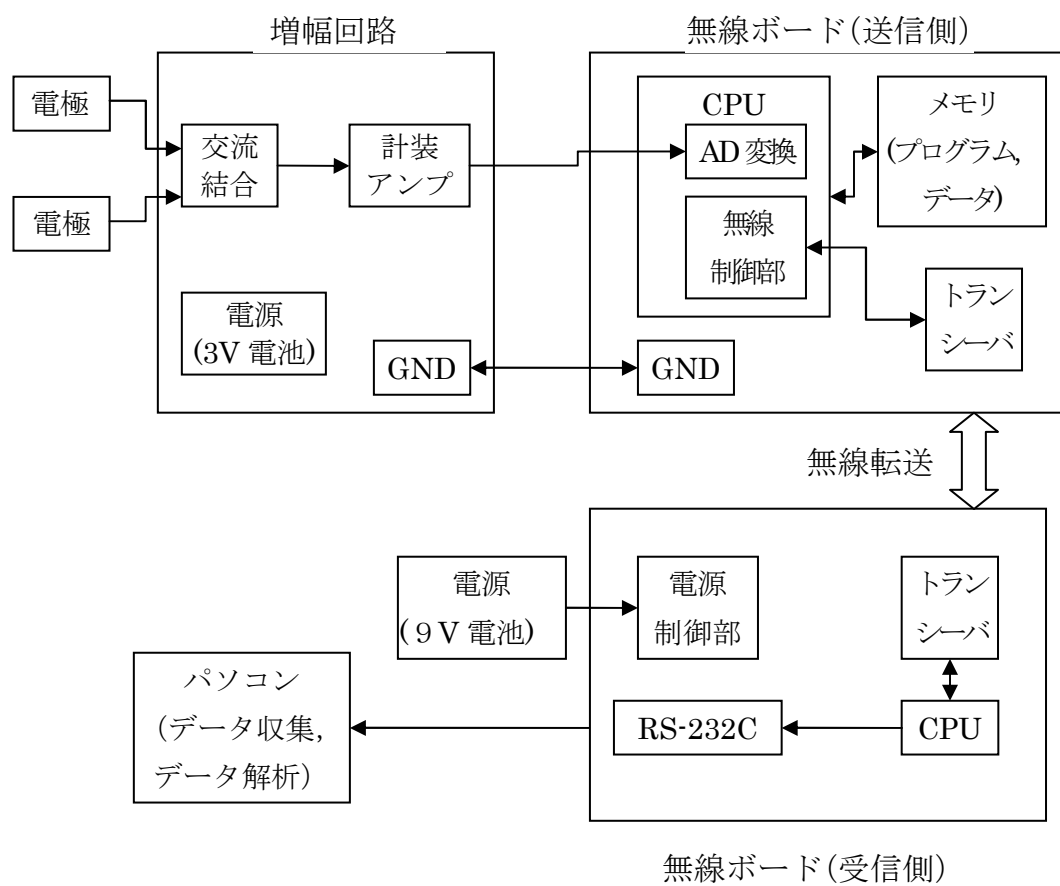


図 3-4. システム構成のブロック図

3.3.2 無線ボード

本研究では無線通信と A/D 変換に、Freescale 社製の、ZigBee 通信用のデモキット 13192DSK-A00 を使用した。無線通信用チップ (MC13192) と制御用に 8 ビットのフラッシュマイコン (MC9S08GT) を搭載し、送受信どちらも行なえる。標準で X-Y 軸加速度センサ (MMA6261Q) と Z 軸加速度センサ (MMA1260D) を搭載している。アナログ信号入力用には 8 ビットの AD 変換機能を 8 チャンネル搭載している。PC との接続はシリアルポートを通じて行なう。ボードの写真を図 3-5 に示す。



図 3-5. 無線ボード

マイコンは書き換え可能であり、デバッガである CodeWarrior により作成したプログラムを専用の機器を使ってマイコンに転送することができる。これにより使用者は無線通信における速度や転送データを自由に制御することが可能である。図 3-6 に無線ボードの内部構成を表すブロック図を示す。

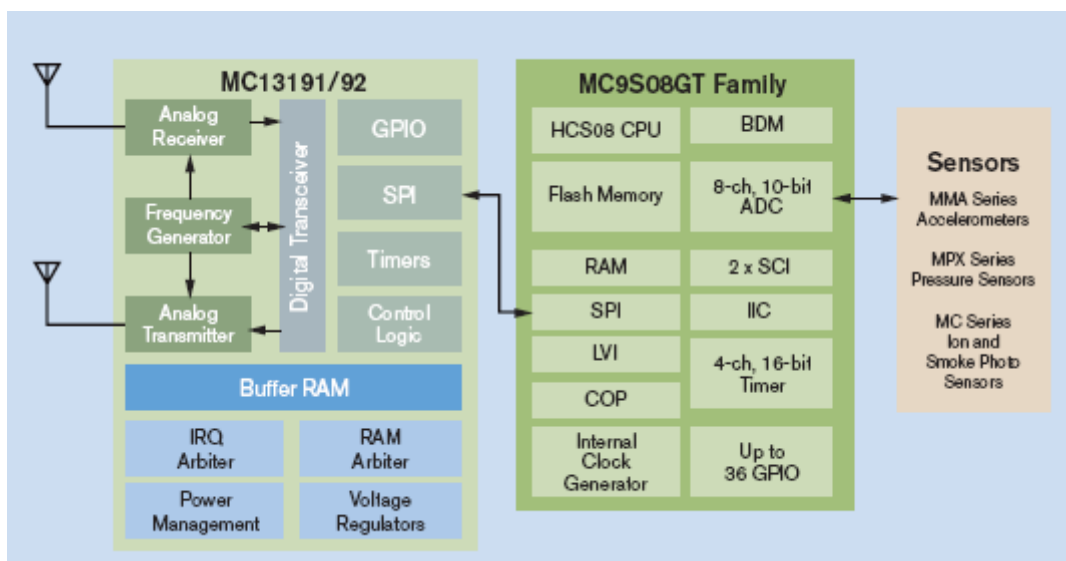


図 3-6. 無線ボード内部構成のブロック図

3.3.3 増幅回路

計測にあたって計装アンプ（AD623, Analog Devices）を使った回路を作成した。増幅率は 1000 倍とした。まず交流結合を入れ、交流成分だけ取り出し、 $1\text{ M}\Omega$ の抵抗を並列につなぎインピーダンスを下げることにより、バイアス電流を上げ計装アンプの動作を安定化させた。その後、計装アンプで増幅し、増幅後にローパスフィルタ（LPF）を入れ、外界からのノイズ対策（商用周波数 50Hz）を行った。増幅回路の回路図を図 3-7 に、写真を図 3-8 に示す。

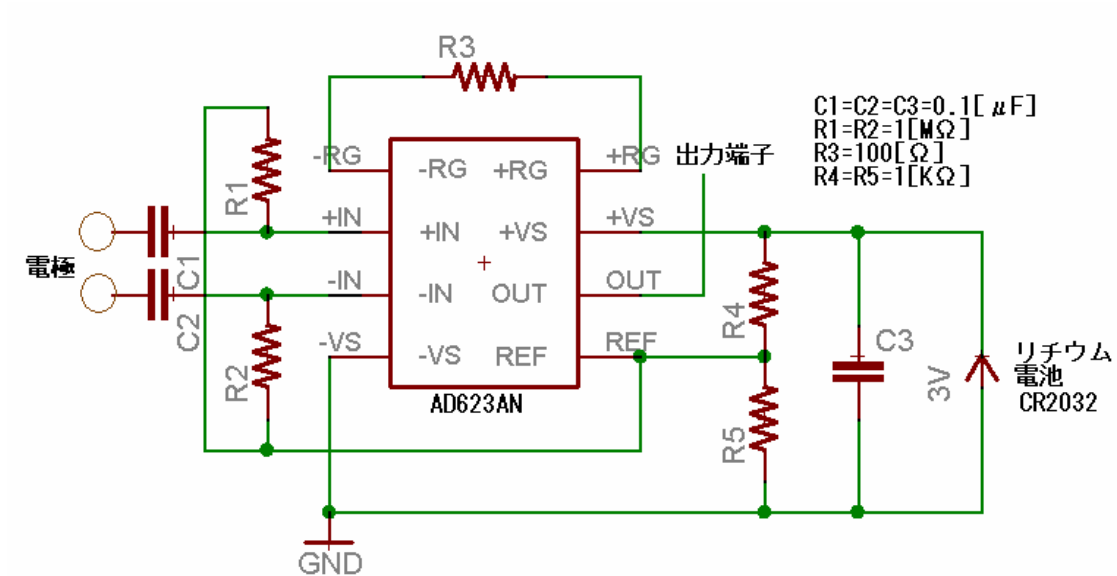


図 3-7. 増幅回路の回路図

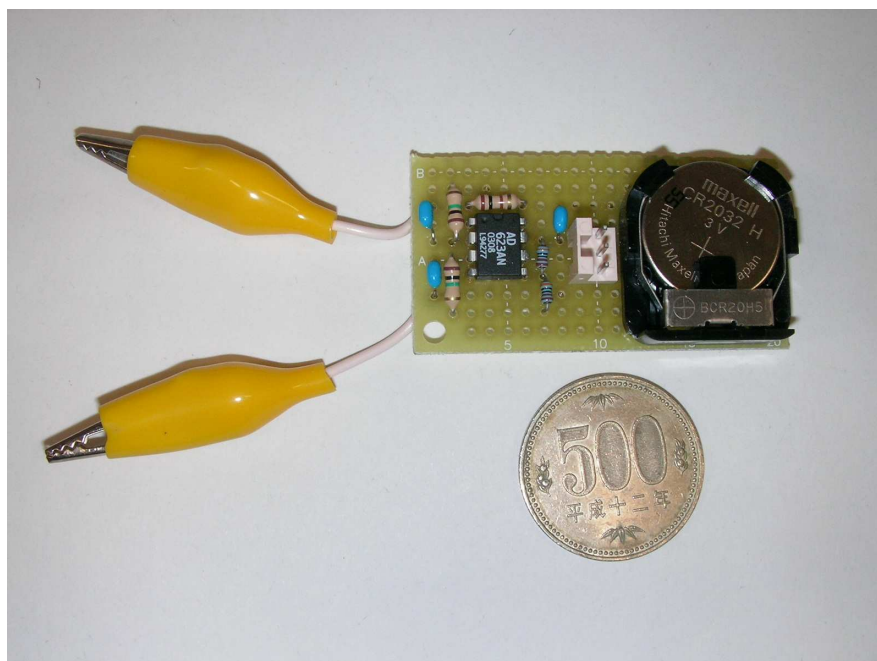


図 3-8. 増幅回路

3.3.4 不関電極について

図 3-4 のシステム構成図を見るとわかる様に，本研究でのシステムでは不関電極は使用していない．表面筋電位計測では計測を行なう電極間における電位を作動増幅して見ているため，この電極間では基準となる電位が存在しない．従来のシステムではその基準となる電位を作るために，不関電極を電位が一定の場所に貼り付ける．したがって値は不関電極の電位を基準にして正負が表れる．これに対して本研究のシステムでは交流結合を入れることにより，直流成分は捨て，計測する電極間の電位の交流成分（変移成分）のみを見ていることになる．したがって電位の絶対的な大きさはわからない．しかし表面筋電位は筋肉内での様々な電位成分や皮膚表面のノイズを加算したものであるため，計測環境によりその値は変化する．したがって，同じ電極間で測った筋電位の大きさは，筋肉の収縮の大きさを表すが，異なる電極間の筋電位の大きさは相対評価することはできない．よって絶対的な筋電位の大きさはそれほど意味を持たず，不関電極がなくても問題はないと考える．

3.4 試作したシステムによる計測

3.4.1 計測内容

全ての計測はサンプリング周波数 500Hz で行った。また計測は全て右足で行なった。以下に実際に行なった計測内容を示す。

計測 1. まず従来システムと変わらず、今回のシステムが正しく動作するか評価するために、両者で同じ動きを計測した。ひざ屈伸運動を 4 秒間隔で行った際の腓腹筋の表面筋電位を計測した。

計測 2. 従来のシステムでは計測することが出来なかった広い範囲における計測、激しい運動における計測を行うために、歩行運動の際の計測と走った時の計測を行った。計測を行った筋肉は腓腹筋と外側広筋（図 3-9 参照）の 2 箇所である。

計測 3. 実際にスポーツを行なっている状況を想定して、サッカーボールを蹴る時の計測を行なった。蹴り方はインステップキックと呼ばれる足の甲でボールを強く蹴る方法。計測した筋肉は計測 2 と同様に、蹴り足（実際にボールを蹴る足）で行なった。

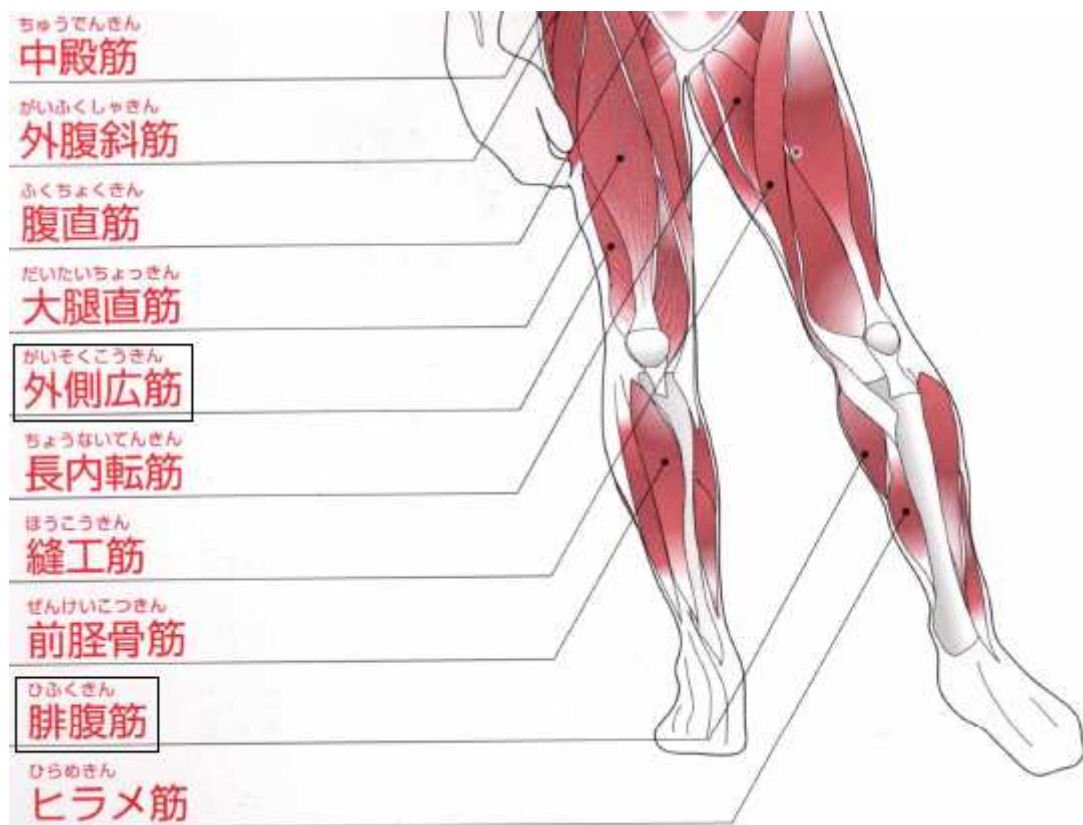


図 3-9. 足の筋肉

「出展：河合 良訓，原島 広至，“肉単”エヌ・ティー・エス，2004.」

3.4.2 計測結果

計測 1. まず結果を以下の図 3-10 に示す.

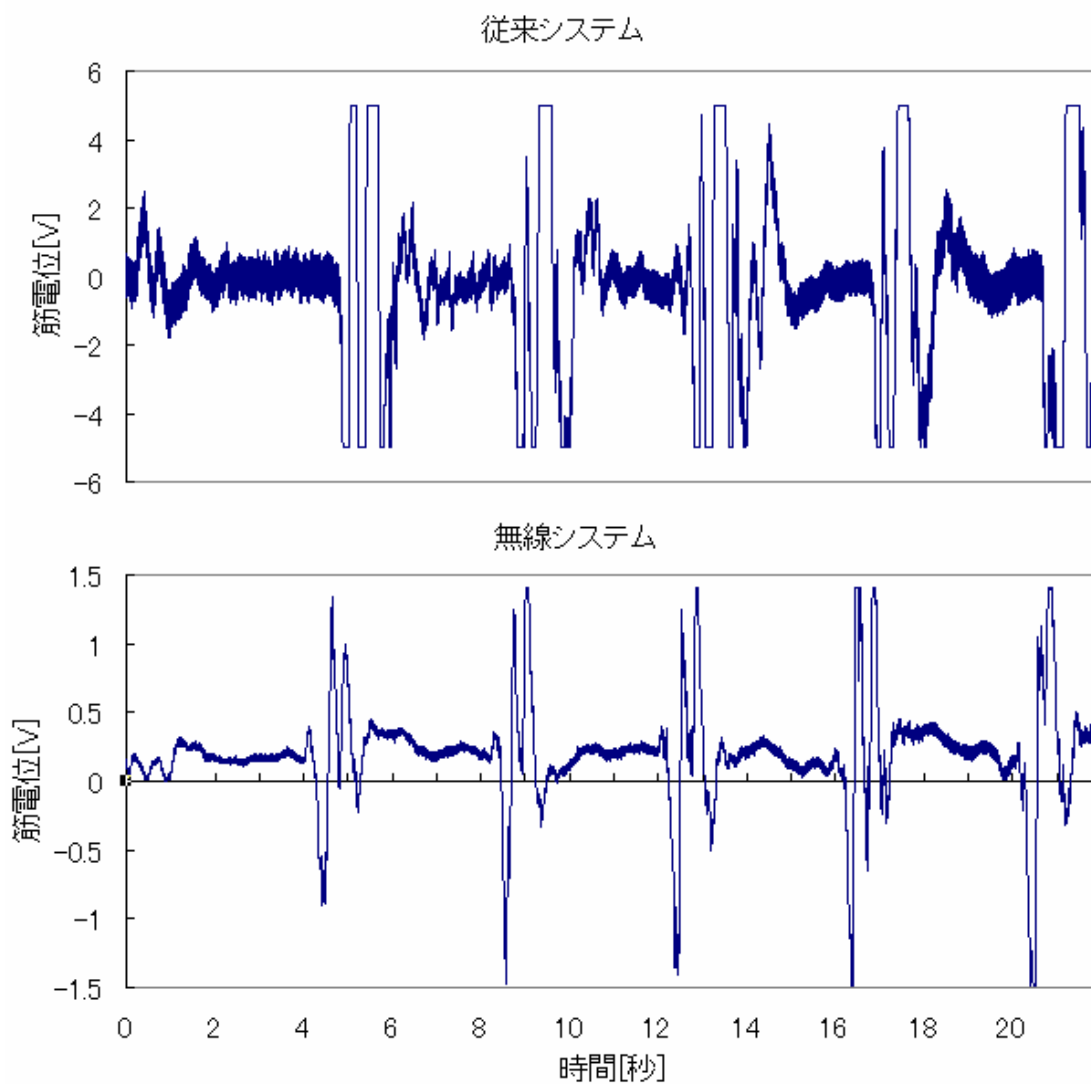


図 3-10. 屈伸運動を行った際の表面筋電位（無線システム）

従来システム，無線システム共に等間隔にパルス状の波形が表れており，屈伸運動を行う際に腓腹筋が反応していることがよくわかる．これにより無線システムが従来システムと同様に正しく動作していることがわかる．

計測 2. まず結果を以下の図 3-11, 図 3-12 に示す.

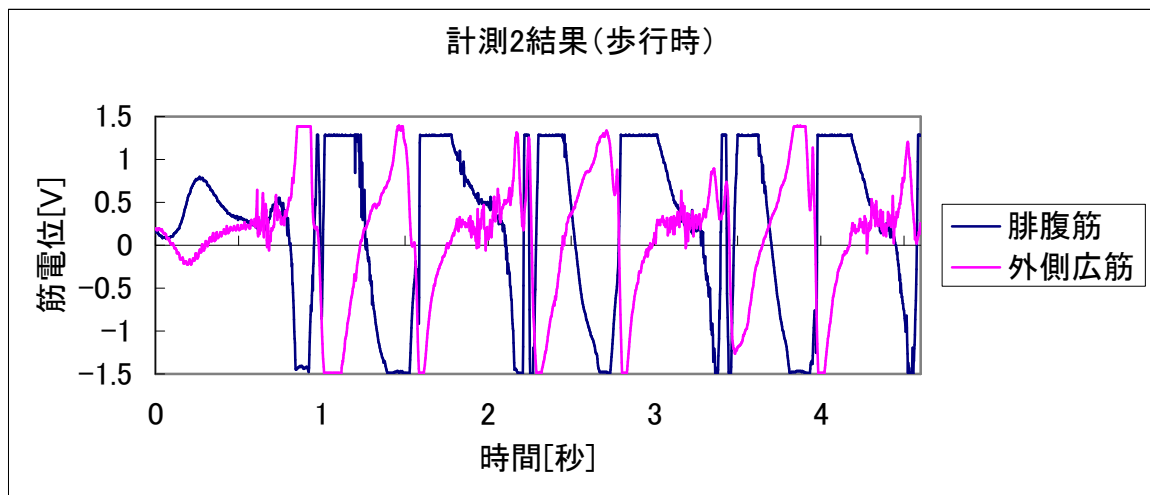


図 3-11. 歩行運動を行った際の表面筋電位（腓腹筋，外側広筋）

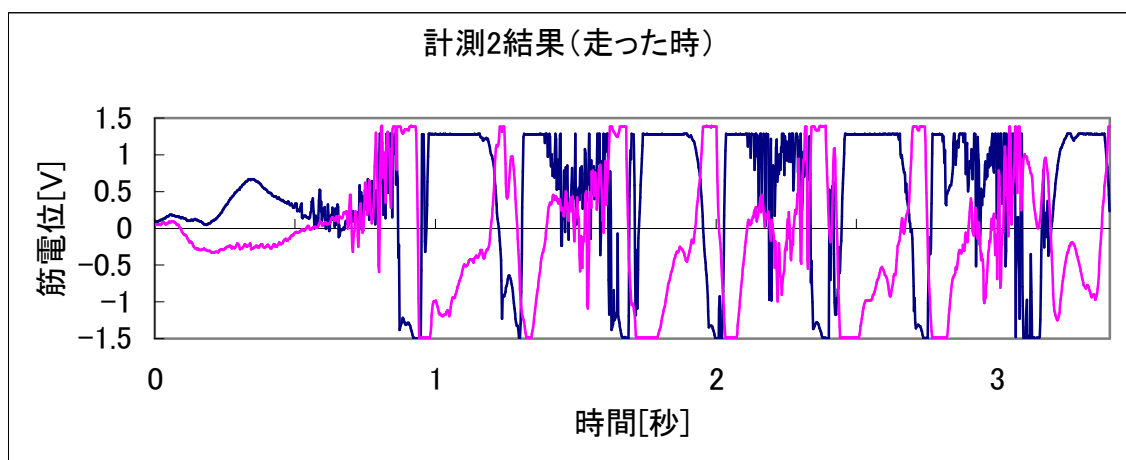


図 3-12. 走った時の表面筋電位

図 3-11 を見ると腓腹筋と外側広筋がリズム的に動いており，歩行が一定のリズムで行われていることを表している．走った時についても同様である．波形が切れているのは値が振り切れているためで，計装アンプの増幅率を変えることにより調節できるので問題はない．両者を比べると基本的には類似した波形

が現れているが、走った時の方が波形の振動が激しく、筋肉がより強く収縮しているとかんがえられる。いずれにせよ、計測は正しく行なわれていると考える。

計測 3. まず結果を以下の図 3-13 に示す。

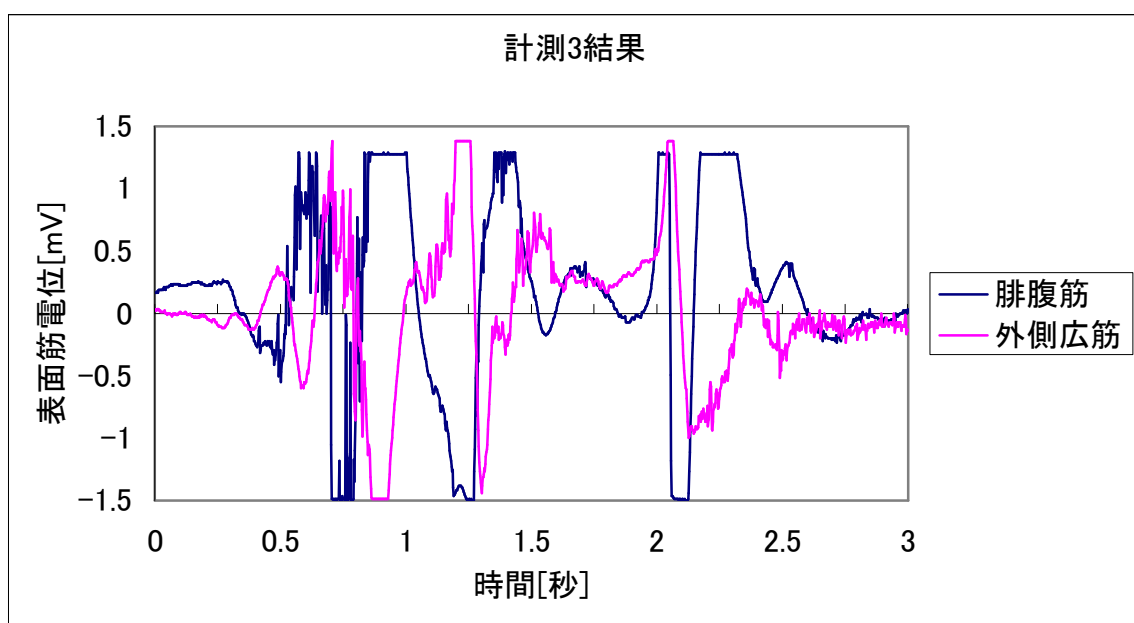


図 3-13. ボールを蹴った時の表面筋電位

波形と動きの対応を説明する。0.5 秒過ぎから起きる荒い波形は、軸足（左足）の踏み込みを行なう際の蹴り足（右足）の動き出しによるものである。1 秒前後の値が振り切れている波は足を振り上げ、振り下ろしによるもので、1.25 秒付近の鋭いピークはボールを蹴った瞬間である。1.5 秒後に波が落ち着くのは、慣性により足を振っている状態で、2 秒付近の大きな反応は地面に足をついた際のものである。このように動きと波形の対応がとれていることから、計測が正しく行なわれていると考える。

3.5 考察

計測 1 の結果より今回試作したシステムが従来システム通りに計測が行なえることがわかった。また、計測 2, 3 より従来システムよりも様々な動作において計測を行なうことができると確認した。加えて、ケーブルを除去したことにより、そこから発生するノイズを無くすことができた。これらの理由から無線を使うことにより、従来システムの問題を解決し、優れたシステムを構築することができることを示した。また無線を用いた運動計測の有効性と可能性を示すことができた。

第4章 ボールの向き推定システムの試作

4.1 背景と目的

第3章で行ったような、無線センサモジュールを用いた運動計測におけるさらなる利用法として、人間が使用する道具の中にセンサを埋め込むことを考えた。これにより、スポーツをはじめとした状況において、人と人が操る道具の両方から情報を得ることができれば、運動計測において非常に有効な発展になると考えられる。また、これらが可能となれば、今まで知ることができなかった側面から人と道具のかかわり合いを知ることができるだろう。

本研究では、無線通信の特徴をより活かす例題として、計測対象にボールを選んだ。ボールの動きを解析する研究は様々なものが行われている。

例えば、野球の変化球の解析などがある。現在の手法はカメラで撮影を行い人間の目では捕らえられない回転をみたり、流体力学にともなってボールの回りに起こる空気摩擦による影響をシミュレーションしたりする手法などがある。

これをボールの内側から見た情報を得ることができれば、違った観点から解析を行うことができ、あらたな発見も可能となるのではないか。一つの試みとして、本章ではボールの中に加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサを埋め込みそれらのデータをリアルタイムで無線送信し、出力データからボール自体の向きを推定するアプリケーションの試作を行なった。

4.2 原理

4.2.1 空間での物体記述

ここで、まず原理を述べるにあたって、空間での位置や姿勢の記述法について説明する。

空間内での物体の位置を記述するには基準座標系{A}が必要となる。この座標系を定義することにより空間内のどんな点でも 3×1 の位置ベクトルによって指し示することができる。そして、空間内での物体の姿勢を記述するためには物体に座標系{B}を設定し、この座標系{B}を記述するのに基準座標系{A}との関係を与える。基準座標系{A}に基づく物体座標系{B}の記述をすることにより、物体の姿勢を与えるのに十分である（図 4-1 参照）。

このように、点の位置はベクトルによって記述され、物体の姿勢は物体に設定された座標系{B}によって記述される。物体座標系{B}の記述法の一つは、座標系{B}の三つの主軸の単位ベクトルを座標系{A}に基づいて表記することである。

座標系{B}の主方向を与える単位ベクトルを座標系{A}に基づいて記述し、その単位ベクトルを列にした 3×3 の行列を作り、これにより物体の姿勢は一意に記述することができる。

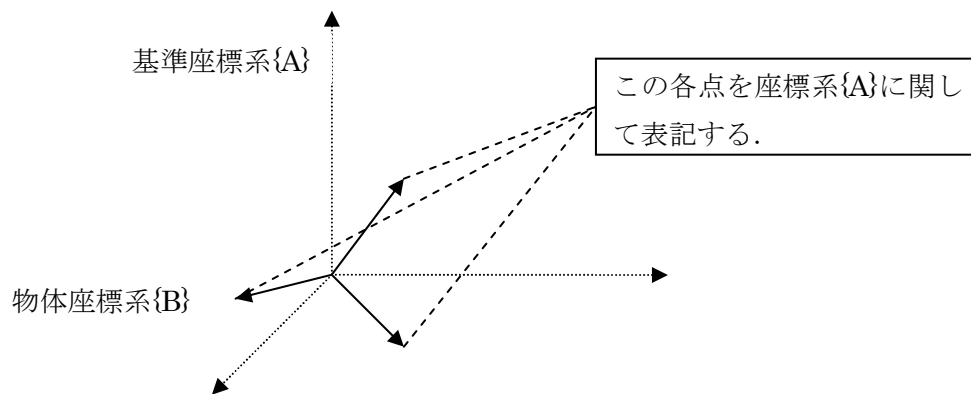


図 4-1. 姿勢による対象の位置決め

4.2.2 ボールの向きの推定原理

ボールの中に 3 軸の磁気センサ, 3 軸の加速度センサ, 1 軸のジャイロセンサを埋め込み, センサの出力から外界座標系から見たボールの姿勢を推定する。

始めに, 図 4-2 に基本となる座標系を定義する。座標系は 2 つ存在し, 1 つは基準座標系となる外界座標系 U である。外界座標系は X 軸を地磁気の地面水平成分とし, Z 軸を地面鉛直方向とする。また, X 軸と Z 軸の外積方向に Y 軸をとる。2 つめは物体座標系となるボール座標系 B である。ボール内の磁気センサをこの座標系に合わせて設定する。

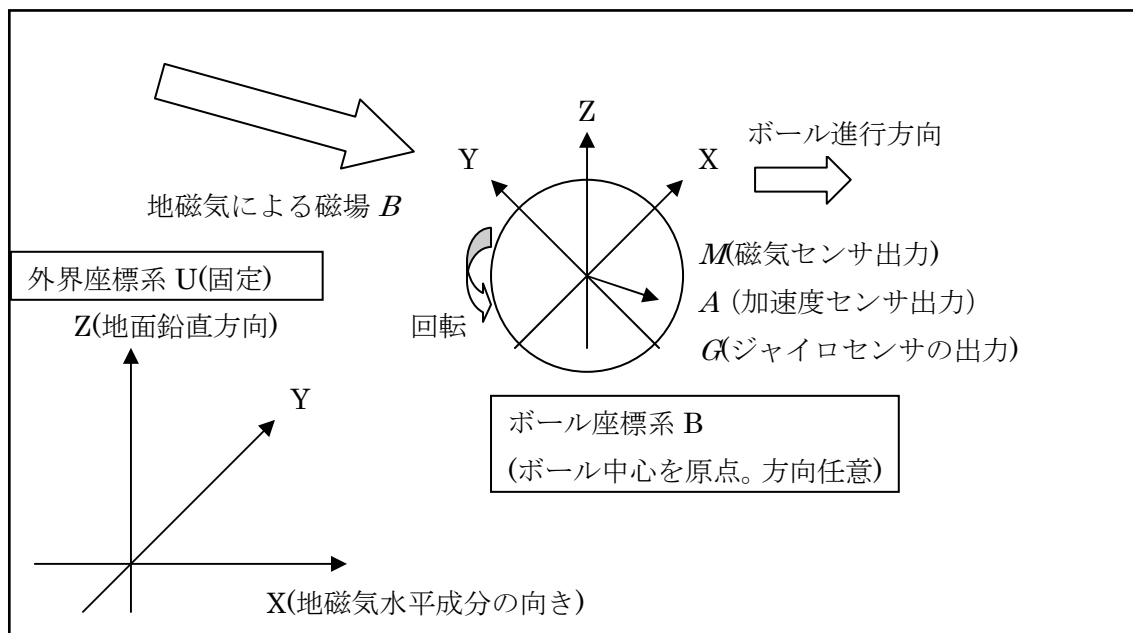


図 4-2. 座標系の決定

これらの座標系に基づいて数値計算を行うと（付録 A 参照），外界座標系でボールの姿勢を記述するには一変数 θ を推定することが必要となる．これはボールの回転軸の向きと，ボール座標系の X ， Y ， Z 軸を合成したベクトルの向きが等しくなり，回転しているにもかかわらず， X ， Y ， Z 成分の出力が常に等しくなる場合による不定性が表れた結果である．この θ の推定にジャイロセンサを使用する．加速度センサは回転による遠心力の影響を受けるため，回転中は使えず初期状態における向きの推定に使用する．

4.3 数値実験

ここで、実際の計測に先立ち、数値実験によりアルゴリズムの性能評価を行い、どの程度の精度でボールの向きを推定できるかを確認した。

4.3.1 アルゴリズム

ここでアルゴリズムの流れについて説明する。

1. 初期状態における外界座標系から見たボール座標系の向きを磁気センサと加速度センサの出力により算出し、初期状態での行列 $R(0)$ を求める。
2. θ を未知パラメータとして次時刻の行列を $R(t + \Delta t, \theta)$ とする。
3. 各 θ に対し、 $R(t + \Delta t, \theta) = dRa \times R(t)$ を満たす dRa を計算する
4. dRa は回転の変化量を表すので、その方向を表すベクトルと回転量を算出する。それは外界座標系で表した角速度ベクトル w となるの。 w を $R(t + \Delta t, \theta)$ に射影することによりジャイロセンサの出力予測値 $\hat{g}(t + \Delta t, \theta)$ を算出する。
5. ジャイロセンサ予測出力 $\hat{g}(t + \Delta t, \theta)$ と実測出力 $g(t + \Delta t)$ の2乗誤差を算出する。

6. 複数の θ の値の中からもっとも誤差の値が小さくなる θ を選び, その θ に

よって $\hat{R}(t+\Delta t)$ を生成する

図 4-3 にフロチャートを示す.

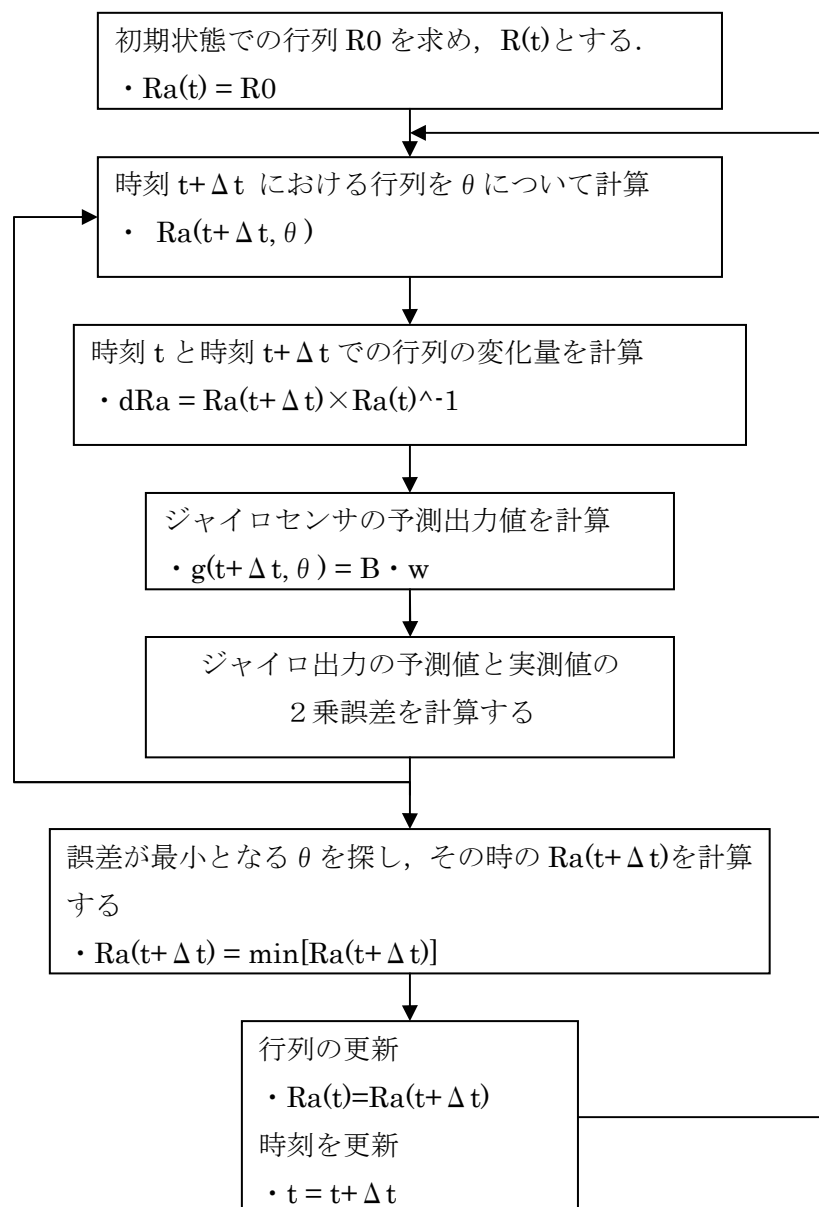


図 4-3, ボールの向き推定アルゴリズムのフロチャート

4.3.2 数値実験の結果

一例として，初期状態を Y 軸周りに 30 度回転させた状態から， Z 軸に関して 1 時刻につき 4 度ずつ等速回転した際のボール座標系基本ベクトルの軌跡を以下の図 4-4 に示す．赤が X 軸，緑が Y 軸，青が Z 軸である．またその時の X ， Y ， Z 成分の角速度を図 4-5 に示す．

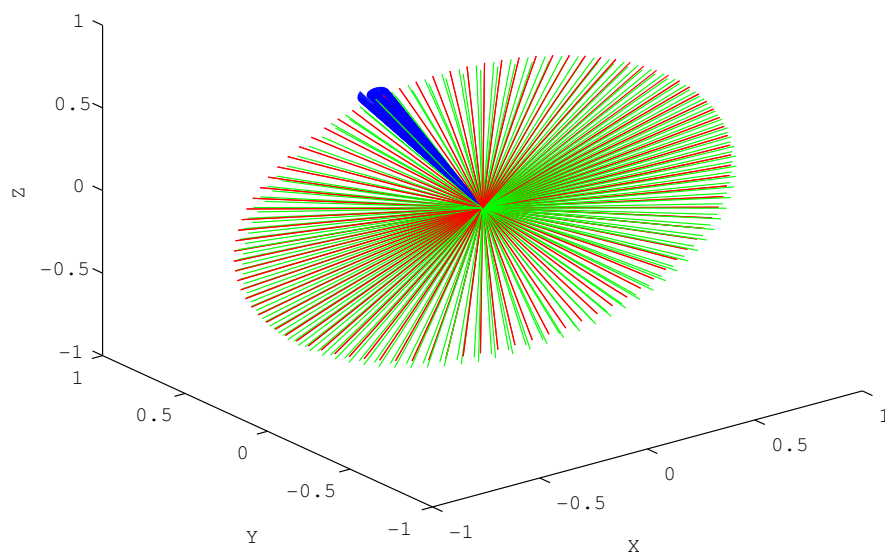


図 4-4. 基本ベクトルの軌跡

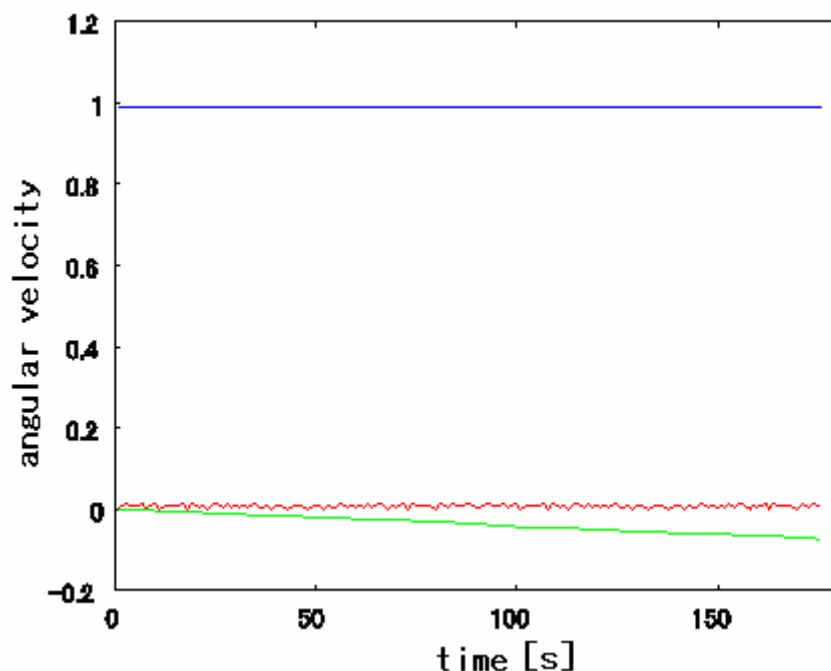


図 4-5. 角速度の変化

本来なら Z 軸は一定となり，残りの軸は円を描く．図 4-4 を見ると Z 軸は変化が少なく，ある程度は正しく求まっていることがわかる．しかし図 4-5 を見ると本来ならば等速運動を行う際の角速度はどの軸に関しても一定にならないのに対して，Y 軸の角速度が線形に変化している．これはマッチングを行なう際にジャイロ出力の予測値と実測値が等しくない時に発生する誤差によるものである．

誤差の量は様々な条件に対して変化し， θ のとり方をより細かくとれば精度も上がるが，いずれに条件においても誤差は線形に表れるので加速度センサで現在の状態を求めなおすことによりオフセットし，解消することも可能である．

4.4 ボール計測システムの試作概要

4.4.1 実験システムの構成

本研究で試作したボールの内部情報を計測するシステムの構成を説明する。このシステムは加速度センサ、磁気センサ、ジャイロセンサ、無線送信機から構成される（図 4-6）。このシステムをボールの内部に埋め込むことにより、ボールの状態をリアルタイムに無線伝送する。

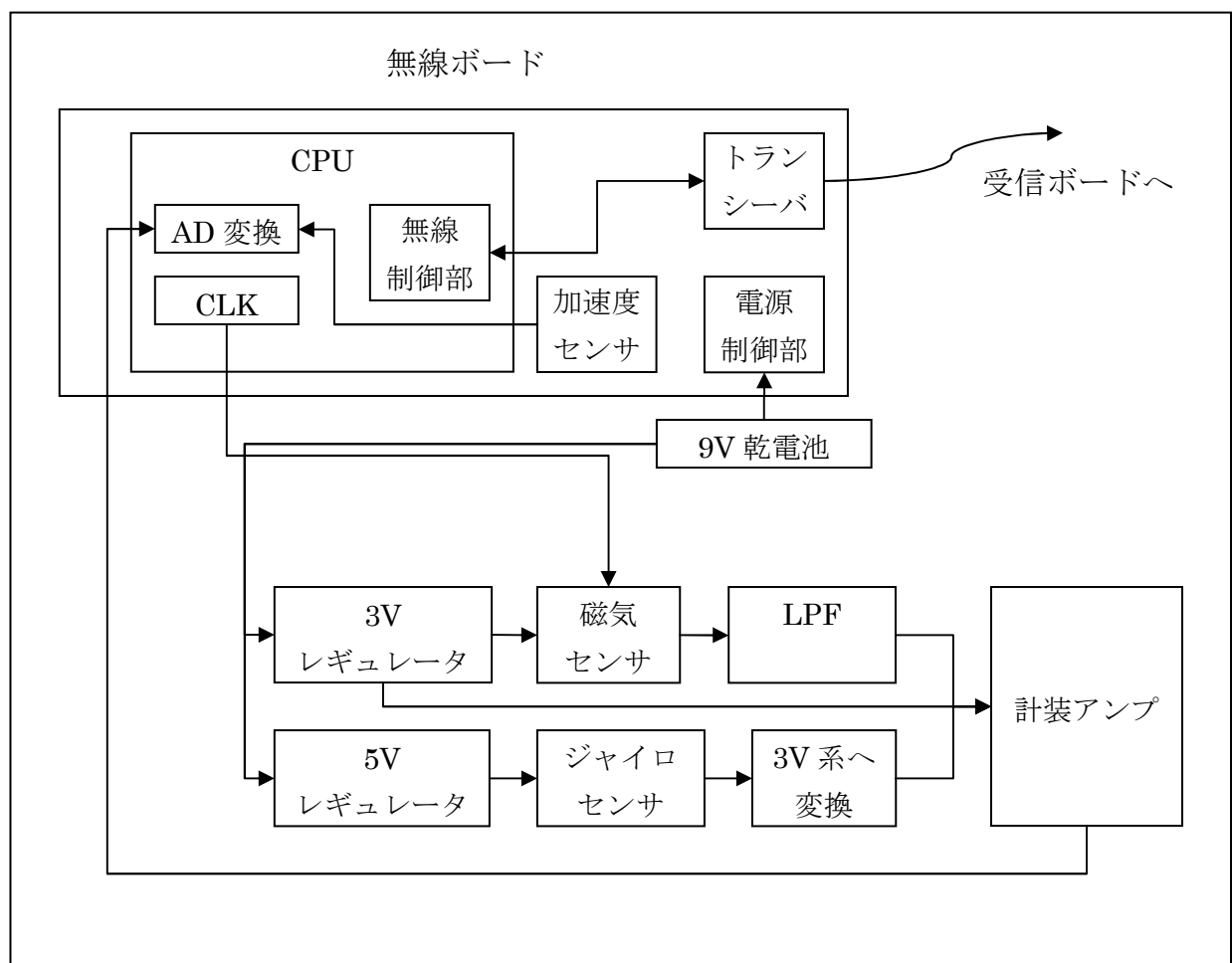


図 4-6. システム構成のブロック図

4.4.1 使用するセンサ

今回使用したセンサは愛知製鋼株式会社製の 3 軸磁気センサ「AMI302」, Analog Devices 社製の 1 軸ジャイロセンサ「ADXRS300」, 無線ボードに搭載された Freescale 社製の 2 軸加速度センサ「MMA6261Q」, 1 軸加速度センサ「MMA1260D」である. 以下の表 4-7 に各センサの特性を示す. 無線通信に関しては 3 章と同様の無線ボードを使用した.

	動作電圧[V]	計測レンジ	外形寸法[mm]
地磁気センサ	3.0	± 6.0 [G]	4.0 x 3.5 x 1.5
ジャイロセンサ	5.0	± 300 [$^{\circ}$ /s]	7.0 x 7.0 x 3.0
X-Y 加速度センサ	3.0	± 1.5 [g]	6.0 x 6.0 x 2.0
Z 加速度センサ	5.0	± 1.5 [g]	10.0 x 7.5 x 3.5

表 4-7. 各センサの特性

4.4.2 センサインターフェース回路

図 4-8 にインターフェース回路の構成を示す. 無線ボードの電源には 9V の乾電池を使用し, レギュレータを使用して 3V 系 (TA48M03F, 東芝), 5V 系 (S813-50HG, セイコー) に変換して各センサに供給した. ジャイロセンサ出力は 5V 系で出力されるので, 抵抗比が 3 : 2 となる様に抵抗を接続し, 抵抗間から電圧をとることにより 3V 系へ変換して, 計装アンプにより増幅した. 地磁

気センサの出力波形を見たところノイズが多く見られたので LPF をかませた。
計装アンプにより増幅された出力電圧は無線ボードの AD 変換機能のピンへと
つなぐ。作製したセンサ回路の写真を図 4-9 に示す。

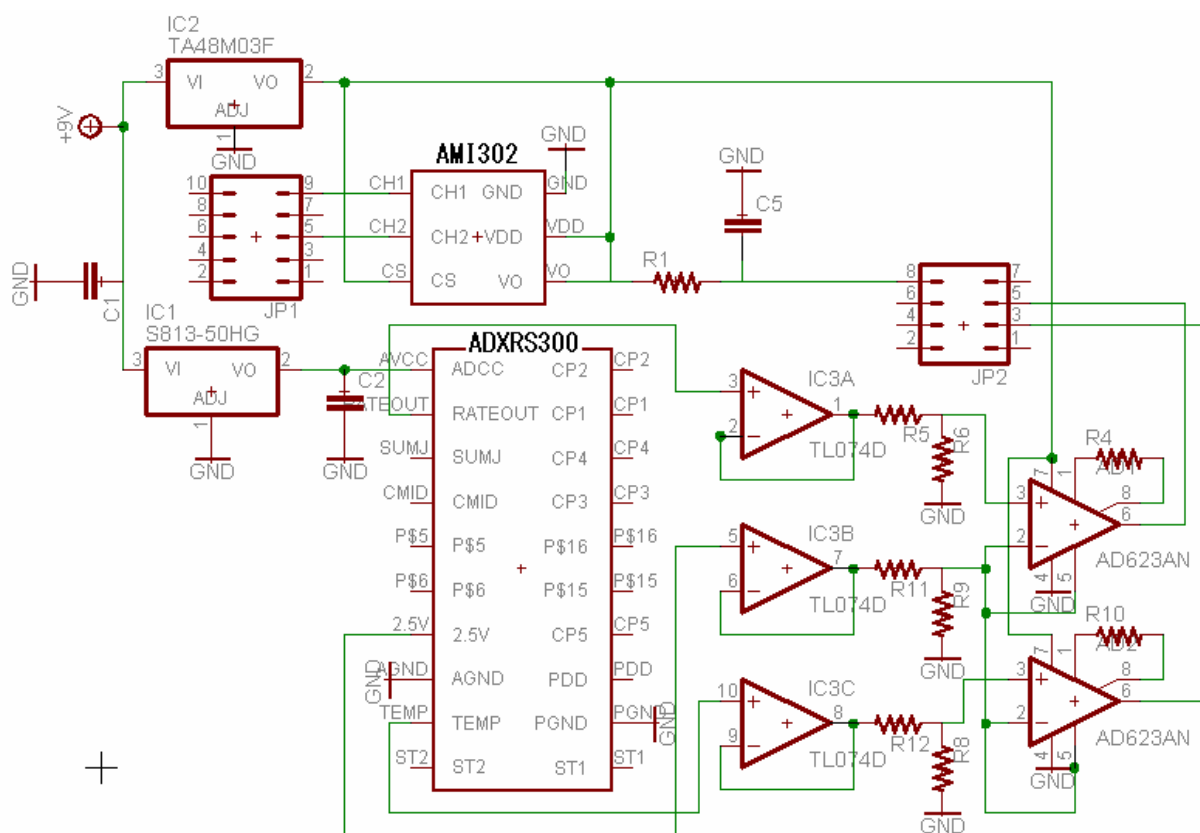


図 4-8. センサ回路図

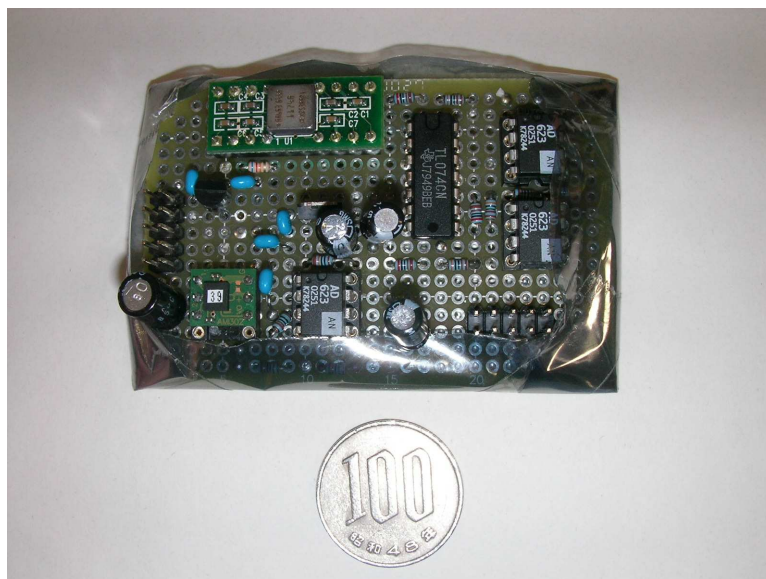


図 4-9. センサ回路の写真

4.5 試作したシステムによる計測

計測は正確な回転状況を知るために、モーターを利用した回転台を作成し、その上に乗せて行なった。まず、シンプルな状況として外界座標系 Z 軸周り（地面鉛直方向）についての回転を想定して行なった。以下の図 4-10 に地磁気センサの出力結果を図 4-11 にジャイロセンサの出力結果を示す。サンプリングレートは 125Hz. モーターの回転速度は 8 秒/回転で行なった。

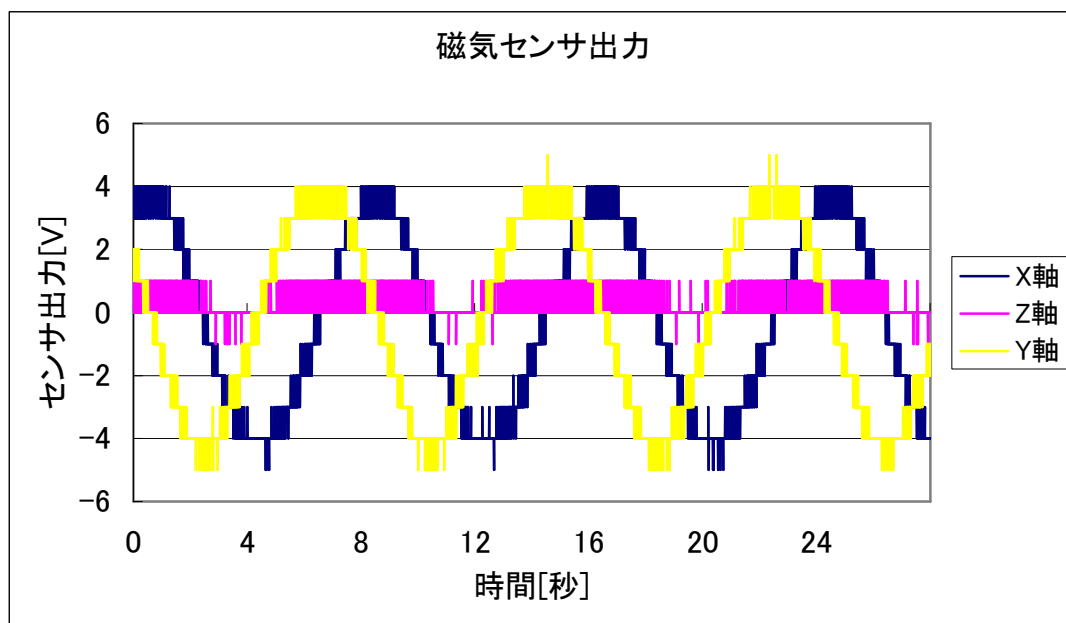


図 4-10. 地磁気センサ出力結果

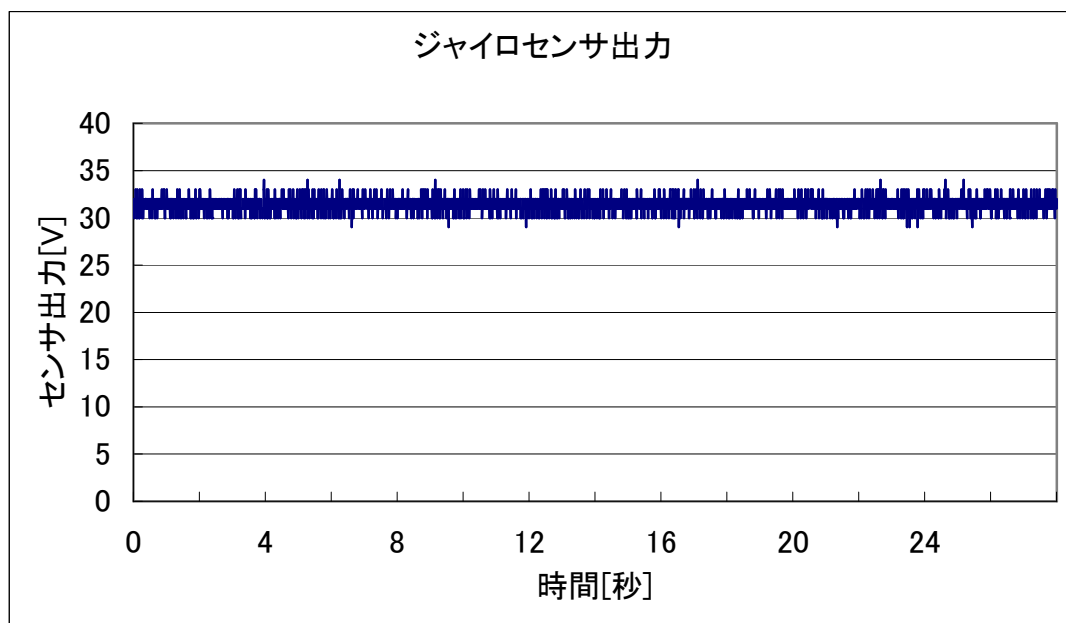


図 4-11. ジャイロセンサ出力

図 4-10 の見ると波形が階段状になっているのがわかる．これは磁気センサの地磁気による影響に対しての出力レンジが狭いこと，現在使用している AD 変換機能が 8 ビットと性能が低いためである．波形を見ると Z 軸はほぼ一定となり，X，Y 軸は sin 波のような波形になっている．Z 軸周りについての回転を計測したのでこの結果は正しいと考えられる．

またその時のジャイロセンサの出力は常に一定となっている．等速回転運動を行ったのでこれも正しい結果と考えられる．

加速度センサの出力については回転前で $(X, Y, Z) = (0, 0, 61)$ となっていた．これは Z 軸のみ重力を受けている状態を示している．

これらのデータからボールの向きの推定を試みた．

4.6 実測データによるボールの向きの推定

前章の実測データからボールの向きの推定を試みたが、初期状態の段階で実際とは異なる値が出てきた。その原因としては以下の要因が考えられる。

実際の地磁気の向きは地面に水平ではなく、地面水平面から 48 度（東京都）傾いている。そのため、磁気センサの出力は重力の向きと直交するように補正する必要がある。加えて行列を正規直交系に直す必要がある。しかし、後者については問題なく行なえるが、前者については伏角を 48 度として計算した結果初期状態をうまく推定できなかった。

これらの問題については今後の課題とする。

4.6 考察

加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサを使用したボールの向きの推定理論を考え、シミュレーションによりそれが正しいことを示すことができた。また、実測用のシステムを作成し、データを収集することができた。実測データによる推定に関しては今後の課題とする。

第5章 結論

本研究では無線センサモジュールを用いた運動計測の有効性と可能性を示すべく、表面筋電位計測への応用と様々なスポーツに使用されるボールの姿勢を推定するシステムの試作を行った。

第3章での無線を用いた表面筋電位計測システムの試作においては、無線データ収集システムに使われる無線センサモジュールを用いた計測が可能であることを示した。これにより、被験者の自由な動きを可能とし、ケーブルによるノイズの影響をなくすことにより、無線を用いた運動計測の有効性と可能性を示すことができた。

第4章においては人が操る道具に無線センサモジュールを埋め込むことにより、道具側の観点から見た情報を得るという、新たな試みを行なった。その結果、加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサを用いた推定法を考え、その原理が正しいことを示した。また、実際に計測を行なうためにシステムを作成し、データを収集することができた。現段階では実データを使用したボールの向きの推定までは至らなかったが、これは今後の課題とする。

本研究により運動計測に無線を用いた新たな可能性を示すことができた。

参考文献

- [1] 松江 英明, 守倉 正博, 佐藤 明雄, 渡辺 和二: 高速ワイヤレスアクセス技術, 電子情報通信学会, 2004.
- [2] 福井 潔, 谷本 晃一, 福永 茂: ZigBee って何だ?, 電子情報通信学会誌, 2005.
- [3] 山形 孝雄 編: Interface 特集 ラスト 1 メートルをつなげ! 短距離通信ネットワーク, CQ 出版株式会社, 2005.
- [4] 中山 俊一 編: Design Wave MAGAZINE 2005 年 10 月号, CQ 出版株式会社, 2005.
- [5] EETIMES Japan, 2005 11 月号, E2Publishing 株式会社, 2005.
- [6] 柳澤 信夫, 柴崎浩: 神経生理を学ぶ人のために 第 2 版, 医学書院, 1997.
- [7] 千野 直一: 臨床筋電図・電気診断学入門, 医学書院, 1977.
- [8] 河合 良訓, 原島 広至: 肉単, エヌ・ティー・エス, 2004.
- [9] 斉藤 伸自, 喜安 善市: 電気回路, 朝倉書店, 1977.
- [10] 馬場 清太郎: OP アンプによる実用回路設計, CQ 出版株式会社, 2004.
- [11] John J.Craig: ロボティクス, 共立出版株式会社, 1991.
- [12] 中山俊一 編: MEMS 開発&活用スタートアップ, CQ 出版株式会社, 2004.
- [13] 横山 直隆: C 言語による H8 マイコンプログラミング入門, 株式会社技術評論社, 2003.
- [14] 今野 邦彦: プリント基板 CAD EAGLE 活用入門, CQ 出版株式会社, 2004.

- [15] 山本 潔 編 : C&C++プログラムのための I/O 制御プログラミング入門,
CQ 出版株式会社, 1997.
- [16] The Math Work,Inc. : Using MATLAB, サイバネットシステム株式会社,
1997.
- [17] Freescale Semiconductor,Inc. : 2.4Ghz,Low Power Tranceiver for
802.15.4, 2004.
- [18] Freescale Semiconductor,Inc. : Simple Media Acess Controller User's
Guide, 2004.
- [19] Freescale Semiconductor,Inc. : M68HC08 to HCS08 Trasition, 2004.
- [20] Freescale Semiconductor,Inc. : Getting Started with HCS08 and
CodeWarrior Using C, 2004.
- [21] Freescale Semiconductor,Inc. : Demonstration Operation Running the
Packet Error Rate,Wireless UART,Accelerometer,Range,and Lighting
Demonstration Applications, 2004.
- [22] Freescale Semiconductor,Inc. : Embedded Bootloader User's Guide, 2004.
- [23] Freescale Semiconductor,Inc. : HCS08 Microcontrollers, 2004.
- [24] Freescale Semiconductor,Inc. : $\pm 1.5g$ Dual Axis Micromachined
Accelerometor, 2004.
- [25] Freescale Semiconductor,Inc. : 802.15.4 MAC/PHY Software User's
Guide, 2004.
- [26] P&E Microcomputer Systems,Inc. : USB HCS08/HCS12 Multilink Rev A
Technical Summary, 2004.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご助言頂いた阪口 豊 助教授，出澤 正徳 教授，石田 文彦 助手，島井 博行 助手に深く感謝いたします．また，共に励ましあい研究を行なったヒューマンインターフェース学講座の皆様に心より感謝いたします．

付録

A ボールの回転推定原理（数値計算）

座標系に関しては図 4-2 に基づいている．

センサ出力を表す変数

磁気センサ出力： $M = (m_1, m_2, m_3)$

磁場： $B = (1, 0, 0)$

ジャイロセンサ出力： $G = (g, 0, 0)$

外界座標系に対するボール座標系の基ベクトルを e_1, e_2, e_3 とおく．

$$\text{また } R = [e_1, e_2, e_3] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \text{ とする}$$

ここでボール座標系 X 軸が磁場の向きに一致しているので

$$B = b \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{—————} \quad \textcircled{1}$$

$$m_i = B \cdot e_i \quad \text{—————} \quad \textcircled{2}$$

となる．（b は定数）

②に①を代入すると

$$m_1 = b \ x_1$$

$$m_2 = b \ x_2 \quad \text{となる。}$$

$$m_3 = b \ x_3$$

ここで $\|M\|=1$ とすると

$$m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 = 1 \quad \text{となり}$$

磁場と X 軸が一致しているので

$$e_1 = \begin{bmatrix} m_1 = x_1 \\ m_2 = y_1 \\ m_3 = z_1 \end{bmatrix} \quad \text{となる。}$$

ここで

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha_1 \cos \theta \\ z_1 &= \alpha_1 \sin \theta \end{aligned} \quad \text{と置くと}$$

$$\|e_1\|^2 = 1 \text{ より}$$

$$m_1^2 + (\alpha_1 \sin \theta)^2 + (\alpha_1 \cos \theta)^2 = 1$$

$$m_1^2 + \alpha_1^2 = 1$$

$$\Rightarrow \alpha_1 = \sqrt{1 - m_1^2} \quad \text{となる。}$$

よって e_1 は

$$e_1 = \begin{bmatrix} m_1 \\ \sqrt{1 - m_1^2} \cos \theta \\ \sqrt{1 - m_1^2} \sin \theta \end{bmatrix} \quad \text{と表せる。}$$

$e_1 \text{ は } \theta \text{ がわかれば決まる。}$

e_2 は

$$e_1 \cdot e_2 = 0 \text{ より}$$

$$x_1 x_2 + y_1 y_1 + z_1 z_2 = 0 \quad \text{—————} \quad \textcircled{3}$$

$$e_1 \times e_2 = e_3 \text{ より}$$

$$y_1 z_2 - z_2 y_1 = m_3 = z_3 \quad \text{—————} \quad \textcircled{4}$$

③④は $y_2 z_2$ に関する連立一次方程式なので

$$\begin{bmatrix} y_1 & z_1 \\ -z_1 & y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \quad \text{と表せる。}$$

ここで

$$\begin{bmatrix} y_1 & z_1 \\ -z_1 & y_1 \end{bmatrix} = \alpha_1 \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{より}$$

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha_1} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -m_1 m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \quad \text{となる。}$$

e_2 もまた θ によって決まる。

同様に e_3 は

$e_3 = e_1 \times e_2$ で求まる。

これは変数 θ がわかればボールの姿勢を一意に記述できることを表している。
 θ は複数の値を与えジャイロセンサの出力予測値と実際の値に関してマッチングを行い、最も誤差が少ない θ をとることにより推測する。

B 無線ボードの通信評価実験

無線通信は周りの環境などによって通信エラーが生じる。そこで、本研究で無線ボードを使用するにあたり、その信頼性を確かめるべく通信評価実験を行なった。その内容と結果を以下に示す。

内容

- 1：距離による通信エラー率の調査。周囲にパソコンなどの電磁波を発生する要因が少なく、見通しの良い理想的な環境でエラー率の調査を行なった。
 6byte のデータを、10ms ごとに送信し、10 秒間でのエラー回数を、距離を変化させて測った。
- 2：環境による通信エラー率の調査。1 と同じ内容を研究室内での障害が多い環境で行なった。

結果 1. 結果を以下の表 B-1 に示す. 縦は通信距離, 横は試行回数である.

	1 回	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
0m	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0.5
1	0	1	2	0	2	0	0	0	0	1	0.8
3	3	0	0	0	1	1	1	1	2	0	0.8
5	2	0	0	2	1	1	0	0	1	2	1.1
7	0	1	0	1	2	2	2	2	1	0	1.0
10	1	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0.5
15	2	2	0	1	0	3	3	2	2	2	1.4
20	1	4	1	2	0	0	0	0	0	1	0.9

表 B-1. 距離によるエラー率の差 (理想的な環境)

結果を見ると, 周りに障害がない環境では距離によるエラー率の差はそれほどなく, 安定した通信を行なえることがわかった.

結果 2. 結果を以下の表 B-2 に示す.

	1 回	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
0m	3	3	1	1	2	1	0	1	0	2	1.6
1	1	1	2	2	2	0	3	2	1	1	1.5
3	1	1	4	2	2	3	1	1	2	0	1.7
5	3	1	1	2	2	0	3	2	2	2	1.8
7	8	8	0	0	4	1	3	1	1	3	2.9
10	76	23	59	2	25	4	6	32	1	3	23.1

結果見ると 1 に比べて, 距離が 10m となるとエラー率が高くなった. やはり周りの環境による影響は重要な要因となることがわかった.