

福祉支援用機器の直感的制御を可能にする

マンーマシン入力インターフェースの開発

Development of the Human Interface for Controlling Welfare Support Machinery

研究代表者

東北大学 電気通信研究所 助教

栢 修 一 郎

[研究の目的]

事故による脳・脊椎損傷患者や長寿化に伴う高齢者の筋力低下による運動機能障害者等の QOL (Quality of Life) 向上のため、他人の介助無しに自らの意志で所望の動作が可能、食事補助、運動機能の回復・支援を目的とした様々な介助機器の開発が進められている。これらの機器に介助に必要な作業を行わせるには、障害者の限られた四肢の動作を基にした機器制御のための動作パターンに、如何に多くのバリエーションを持たせられるかが重要となる。そのためには、障害による四肢の限られた動作を妨げることなく正確にトレース可能な計測技術が必須である。本研究では、これまでに開発を行ってきた位置・方向検出システムをベースにして、被験者の手や腕などに貼付した複数の小型・軽量の LC 共振型ワイヤレス磁気マーカの位置・方向を、添付部位の動きに応じてストレスフリ

ーおよびフォースフリーな状態で正確かつリアルタイムにトレースし、そのトレースデータを基にして、様々な動作のサポートが可能な福祉支援用ロボットアーム等の機器の動作を、被験者が直感的に制御可能な入力インターフェースの開発を目指す。

[研究の内容、成果]

○位置・方向検出システムの構成と検出原理

位置方向検出システムの模式図を図 1 に、また実際のシステムを図 2 に示す。一辺 390 mm の正方形型アクリル製巻き枠に巻かれた励磁コイル(線径 0.3 mm×13 回巻き)と、直径 25 mm のアクリル製ボビンに巻かれた 25 個の検出コイル(線径 0.1 mm×40 回巻き)が 45 mm 間隔で 5×5 のマトリクス状に配置されている検出コイルアレイを 25 mm の間隔且つ励磁コイルおよび検出コイルアレイ中心に配置した検出

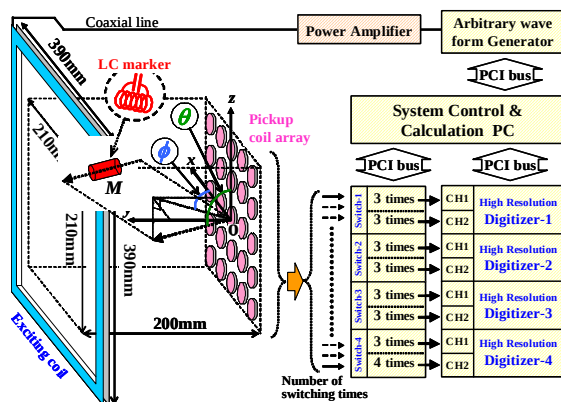


図 1 位置・方向検出システムの模式図

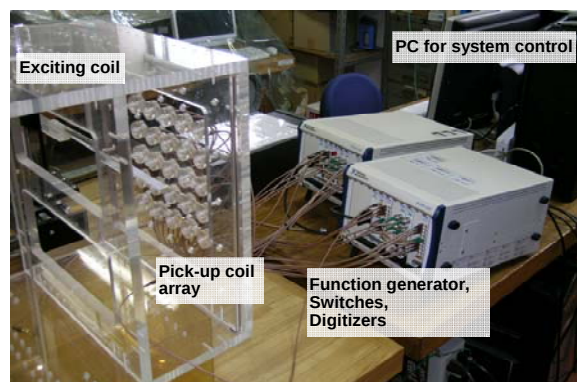


図 2 構築した位置・方向検出システム

コイルの中心軸が一致するように対置している。また、各検出コイルはスイッチモジュールを介して誘起された電圧波形を計測するためのデジタル計測器に接続されている。これに加えて、励磁波を生成するための任意波形発生装置およびパワーアンプと、システム全体を制御し LC マーカの位置を算出するためのパソコンから成る。2 系統の入力端子を有したデジタル計 4 台と、スイッチモジュール 4 台を用いて、それぞれに 3 個または 4 個の検出コイルを割り当て、同時に 8 個ずつの検出コイルの電圧測定を行うことが可能である。

検出空間内に配置された LC マーカの位置と方向を求めるには、LC マーカが発生する誘導磁界を検出コイルによって測定する必要がある。しかし、LC マーカを駆動するための励磁磁界と LC マーカが発生する誘導磁界は同じ周波数成分を持つため、直接測定することは困難であるが、以下の手順を経ることで間接的に測定することが可能である。

検出コイルに誘起される電圧について、検出空間内の LC マーカの有無に対する LC マーカ共振周波数付近の周波数特性を図 2 に示す。ここで、LC マーカ挿入前に検出コイルに誘起された電圧をバックグラウンド電圧 V_{BG} と定義し図 2 中の青色の波線で示す。次に LC マーカを挿入したときの誘起電圧を図 3 の赤色の実線で示す。共振周波数の前後に極値を持つのは、励磁磁界に対して誘導磁界の位相が大きくずれるためである。両者の差分を取ったピークーピーク電圧は LC マーカが発生する磁界強度に比例するため、本論文ではマーカ寄与電圧 V_{MK} と定義し、全検出コイルの V_{MK} を測定して、後で述べる算出原理に基づいて位置および方向を求めている。図 2 において、LC マーカの共振周波数前後の f_1, f_2 についての電圧をそれぞれ計測し V_{MK} を得る必要がある。そこで、必要な複数の周波数成分を重畳させた重畳波（PC 上で作成）でマーカの励磁を行い、高速サンプリングが可能なデジタル計測器で誘起電圧波形を測定し、PC 上で FFT 解析を行うことで各周波数成分のスペク

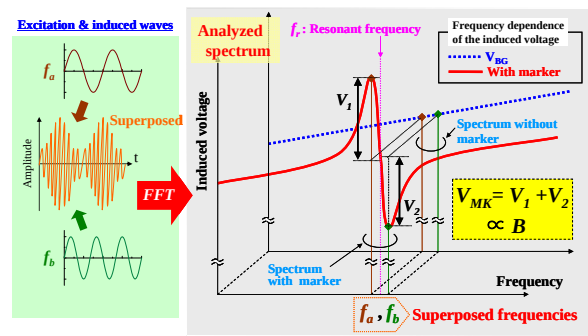


図3 LC マーカの発する誘導磁界による誘起電圧分の測定方法の概念図

トル強度として電圧振幅を得る手法を用いた。これにより LC マーカの数に依存せず同時に複数の周波数成分の電圧測定が可能となる。また本研究のシステムでは、使用周波数帯域幅を考慮しサンプリング周波数を 5 MHz とした。これに対し FFT 解析の周波数分解能が 1 kHz になるように、サンプリング数を 5,000 個とした。

○位置・方向の算出方法

本研究では LC マーカから発生する誘導磁界をダイポール磁界に近似できると仮定して、式 (1) ～ (3) に従い、非線形最小二乗法を用いてマーカの位置および方向を算出した。また Gauss-Newton 法により最適化を行った。

$$S(\vec{p}) = \sum_{i=1}^n \left\| \vec{B}^{(i)}_{meas} - \vec{B}^{(i)}_{cal}(\vec{p}) \right\|^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (1)$$

$$\vec{B}^{(i)}_{cal}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi} \left\{ -\frac{\vec{M}}{r_i^3} + \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r}_i) \cdot \vec{r}_i}{r_i^5} \right\} \quad (2)$$

$$\vec{p} = (x, y, z, \theta, \phi, M) \quad (3)$$

ここで $S(\vec{p})$ は評価関数、 n は検出コイルの数、 i は検出コイルの番号 (1～25)、 $\vec{B}^{(i)}_{meas}$ は検出コイル i における磁束密度の測定値、 $\vec{B}^{(i)}_{cal}$ はダイポール磁界を考慮した検出コイル i における磁束密度の理論値、 $\vec{r}_i$ は検出コイル i の中心からマーカまでの位置ベクトル、 $\vec{M}$ はマーカの磁気モーメント、 θ は x-y 平面に射影したモーメントの方向ベクトルと x 軸と

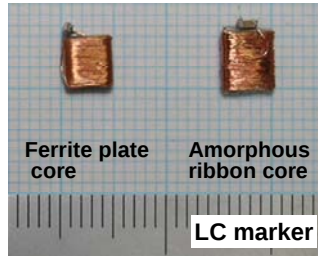


図4 試作したLCマーカ（左：フェライトコア，右：アモルファス積層コア）

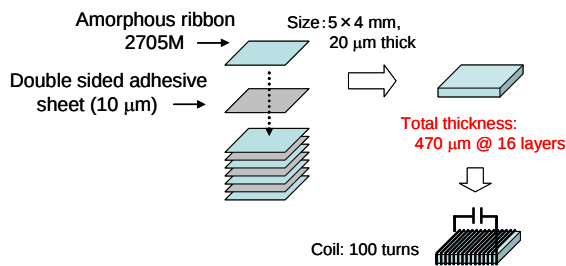


図5 アモルファスリボン積層磁心の作製方法

のなす角， ϕ はモーメントの方向ベクトルと z 軸のなす角(図 1 参照)， $\vec{p}$ はマーカのパラメータにより構成されるベクトル量である。

○小型 LC マーカの設計・試作

被験者の手や腕に貼付しても違和感のない LC マーカ作製に関して，厚さ 0.5 mm のフェライト板(寸法 $5 \times 4\text{ mm}$) と，厚さ $20\text{ }\mu\text{m}$ のアモルファスリボンを絶縁積層した磁心を用いてマーカの小型・薄型化を試みた。図4に試作した LC マーカを示す。

まず寸法 $5 \times 4\text{ mm}$ ，厚さ 0.5 mm の板状の Ni-Zn フェライト磁心に，直径 0.1 mm の銅線を100回巻きマーカ用コイルとした。次に高周波域でも高透磁率を示す金属磁性材料として日立金属社製 Co 系アモルファスリボン (Metglas 2705M) を用意した。アモルファスリボンを積層する際に，厚さ $10\text{ }\mu\text{m}$ の極薄両面テープを接着・絶縁層に使用した(図 5 参照)。両面テープで絶縁することにより，層間を流れる渦電流を抑制することができる。またアモルファスリボンについては，誘導磁気異方性の制御による使用周波数帯域での磁気特性向上化について検討を行うため，未熱処理の状態で積層したコアと， 3 kOe の静磁界中熱処理を施したりボンをういた積層コア

表 1 試作した LC マーカのパラメータ

	as-cast	200℃	250℃	300℃	350℃	ferrite
L [μH]	73.7	66.2	72.3	71.4	61.7	71.3
C [pF]	2,300	2,590	2,350	2,350	2,590	2,350
Resonant freq. [kHz]	398	402	399	399	406	401
Quality factor	36.8	34.8	36.1	34.9	34.3	46.5
V_{MK} [μV]	63.9	69.4	58.9	62.7	64.6	64.8

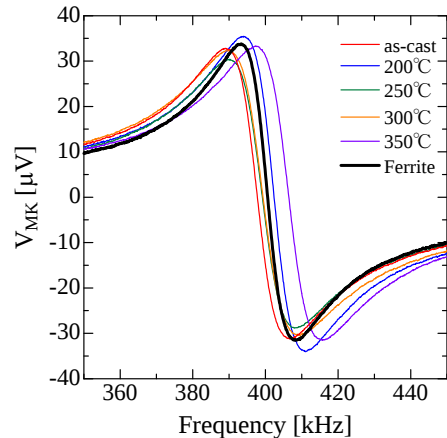


図6 試作した小型 LC マーカの寄与電圧 (V_{MK}) 特性の測定結果

について評価した。リボン材を $5\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ のサイズに切り出した後，積層する前に $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 毎に $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ までの範囲で熱処理を行った。個々のリボン材の磁気特性を最適化することで，位置検出時の S/N 比の向上が期待できる。

未熱処理および熱処理を施したりボンを，2 枚刻みで 16 枚まで積層させたコアを作製した。次に，コアを非磁性のプラスチック板製空心コイル枠(100 回巻き)に挿入し，ベクトルネットワークアナライザで周波数特性を測定しコイルの Q 値を算出した。 Q 値を上げるためには，アモルファスリボンの積層枚数を増やすか，コイルの銅線の巻き数を増やす 2 通りがある。コイル部の積層枚数と銅線の巻き数の最適条件を考えると， 5 mm 幅に巻ける銅線は 1 層あたり 40 巻き程度であり，1 層巻くと線径 $0.1\text{ mm} \times 2$ 程度の厚みが増すことになる。本検討では 16 枚の積層コアに銅線を直接 100 回巻いたところ，厚さは約 1.1 mm となった。

試作した各マーカのパラメータを表 1 に示す。マーカの共振周波数設定にあたって，各マーカコイル

の Q 値が最も高くなる周波数帯域を考慮しつつ、全てのマークができるだけ同じ帯域に共振周波数を設定できるようにチップコンデンサを選んだ。これによりほぼ同じ条件でマークの性能を評価可能となる。

次に、励磁波の測定周波数を決定するため、マークの発する誘導磁界による寄与電圧の計測を行った。それぞれのマークの共振周波数域において励磁界の周波数を 0.1 kHz 刻みで掃引し、バックグラウンド電圧 V_{BG} を測定した後、LC マークを挿入し、誘起電圧の周波数特性を測定した。これらの電圧データの差分を取って、図 6 に示すようにマーク寄与電圧 V_{MK} の周波数特性を算出し、マーク寄与電圧が極大および極小になる周波数を調べた。その際、図 7 に示すように、LC マークは座標 (0, 50, 0) にそのマークの中心軸が励磁コイル軸および検出コイル軸に対し平行になるように配置した ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$)。このとき原点(検出コイルアレイの中心に配置されたコイル)に発生した誘起電圧を計測して測定周波数を決定した。

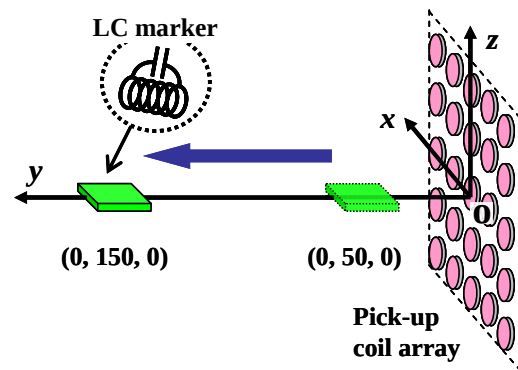


図7 LC マークと検出コイルの配置図

LC マークの移動には、レーザ変位計と三軸ステージを組み合わせたシステムを用いた。この位置決めシステムは、LC マークを移動精度 0.1 mm 以下での移動が可能である。座標 (0, 50, 0) から y 軸方向へ 10mm 刻みで (0, 150, 0) まで LC マークを移動させ (図 7 参照)、各座標においてそれぞれ 10 回の位置検出を行った。その際、励磁コイルには 6 V で印加した。励磁コイルのインピーダンスを考慮すると、電流値は約 0.03 A 程度である。

○検出位置精度の評価

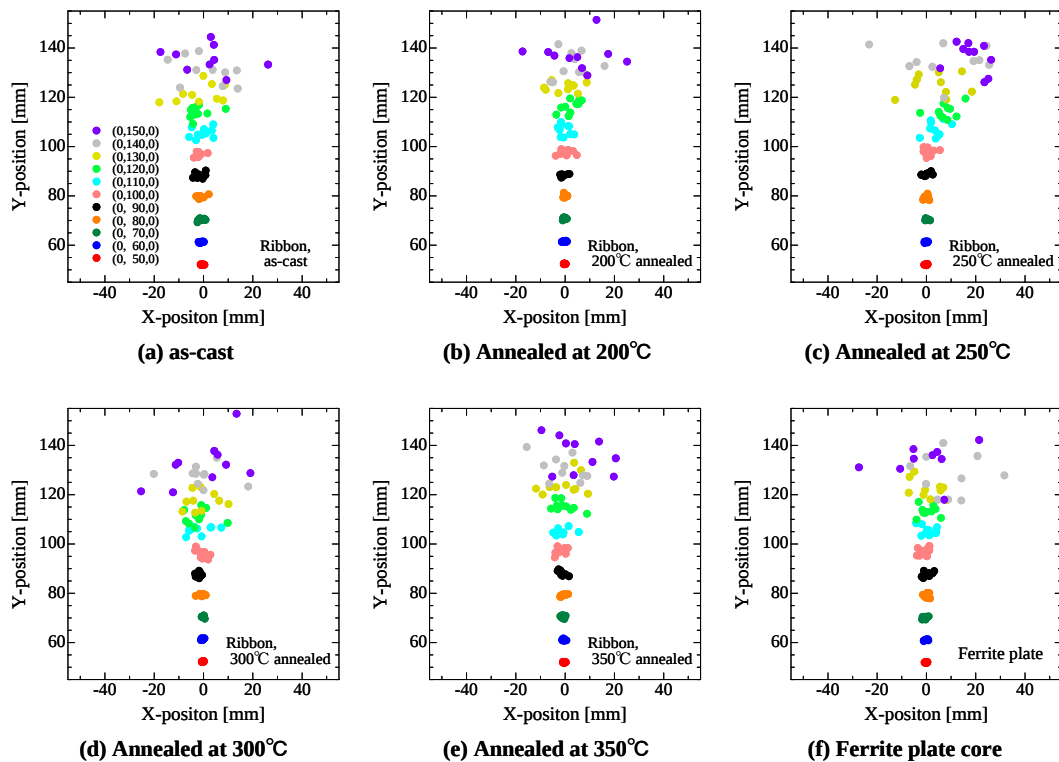


図8 試作した小型 LC マークを用いた位置検出評価結果

図 8 に各 LC マーカを用いた位置検出システムによる評価結果を示す。検出コイルからの距離が大きくなるにしたがって検出位置のばらつきが大きくなっていく傾向にあることがわかる。詳細な評価のためにアモルファスリボン積層コアの未熱処理、200℃熱処理、フェライト薄板コアの 3 つの LC マーカについて比較検討を行った。それぞれの LC マーカの繰り返し位置計測時のばらつき範囲について表 2 にまとめた。ばらつきの範囲が 1 mm 以下となるのは、いずれの LC マーカも (0, 50, 0) までであるが、2 mm 以下となる座標は 200℃熱処理を施した積層リボンコアの LC マーカがもっとも遠く (0, 80, 0) までであった。しかしながら、5 mm 以下で評価するといずれも (0, 100, 0) となり同程度であることがわかる。これは図 6 の寄与電圧の測定結果が全ての LC マーカで同程度であることから、測定時のシステムのノイズが一定であるため、S/N 比は同程度となることから説明される。今回、励磁界発生に増幅器は使用しておらず、発振器の最大出力である 6 V を印加して評価を行ったが、低ノイズの増幅器を用いることで S/N 比の向上が期待でき、検出位置精度の更なる改善が可能であると考えられる。またリボン積層コアについて、積層前の磁場中熱処理による磁気異方性の制御といった面では明確な効果を確認することはできなかった。

○まとめ

以上の研究の結果、次のような知見が得られた。位置・方向検出システムにおいて、高分解能デジタル 3 台を追加したことにより、従来の 1 台の場合に比べシステムの動作が高速化され、よりリアルタイムに近い計測が可能となった。

フェライト薄板コアおよびリボン積層コアからなる LC マーカの位置検出システムによる性能評価を行った結果、検出コイルアレイから 50 mm 程度の範囲で検出位置のばらつき 1 mm 立方以下と、同程度の結果を示した。励磁系に低ノイズの増幅器を用いることで、1 mm 立方以下の位置精度を維持できる空間を拡大できるも

表 2 繰り返し位置計測時のばらつき

Accuracy	position	
> 1 mm ³	as-cast	~(0,50,0)
	200 °C	~(0,50,0)
	Ferrite	~(0,50,0)
> 2 mm ³	position	
	as-cast	~(0,70,0)
	200 °C	~(0,80,0)
	Ferrite	~(0,70,0)
> 5 mm ³	position	
	as-cast	~(0,100,0)
	200 °C	~(0,100,0)
	Ferrite	~(0,100,0)

のと思われる。しかしながら、コア全体に占める磁性材の割合やこのサイズにおけるフェライト磁心の破損しやすさを考慮すると、アモルファスリボン積層コアは LC マーカのコア材として適用可能である。また、アモルファスリボンを絶縁積層した磁心を用いたマーカについて、磁場中熱処理を施す前後およびその温度で明確な性能の差は確認されなかった。

[今後の研究の方向、課題]

これまでに得られた結果を基にして、今後はより高精度の位置検出システムの実現を目指して、検出系の見直しを図ると共に、LC マーカのさらなる小型化の実現を目指す。また実際のロボットアーム・ハンド等の機器と本位置・方向検出システムを組み合わせ、福祉支援システムの開発へと研究を展開していく予定である。

[成果の発表、論文等]

論文発表

- 1) S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, M. Ohya, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: Development of magnetic motion capture system for multi-position detection, Sens. Let., vol. 5, no. 1, pp. 300-303 (2007).
- 2) S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: Wireless magnetic motion capture system - compensatory tracking of positional

error caused by mutual inductance $\pm$, IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2364-2366 (2007).

3) S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai, H. Kanetaka: Wireless magnetic motion capture system using multiple LC resonant magnetic markers with high accuracy, Sens. Act. A: Phys., vol. 142, no. 2, pp. 520-527 (2008).

4) S. Hashi, S. Yabukami, H. Kanetaka, K. Ishiyama, K. I. Arai: Numerical Study on the Improvement of Detection Accuracy for a Wireless Motion Capture System, IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 6, pp. 2736-2739 (2009).

5) S. Hashi, M. Ohya, M. Uchiyama, S. Yabukami, H. Kanetaka, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai: Study on downsizing of LC markers for wireless magnetic motion capture system, Sens. Let., (2009) in press.

and pick-up coil array for wireless magnetic motion sensing system, International Conference on Magnetism 2009, CR10, (May 6, 2009).

学会発表

1) S. Hashi, M. Ohya, M. Uchiyama, S. Yabukami, H. Kanetaka, K. Ishiyama, Y. Okazaki and K. I. Arai: Study on downsizing of LC markers for a wireless magnetic motion capture system, 8th European Magnetic Sensors and Actuators, TuP16, (July 1, 2008).

2) 栢修一郎, 神坂文康, 薮上信, 金高弘恭, 石山和志, 荒井賢一: 励磁コイル及び検出コイルアレイ一体型位置検出システムの検討, 第32回日本磁気学会学術講演会, 講演番号: 14p1PS-83(E), 講演日: 平成20年9月14日

3) S. Hashi, S. Yabukami, H. Kanetaka, K. Ishiyama, and K. I. Arai: Numerical Study on Improvement of Detection Accuracy for Wireless Magnetic Motion Capture System, Asian Magnetic Conference 2008, AQ11, (December 10, 2008).

4) 神坂文康, 栢修一郎, 金高弘恭, 石山和志, 薮上信, 荒井賢一: 位置検出システム用アモルファスリボン積層薄型磁気マーカに関する検討, 平成21年電気学会全国大会, 講演番号: 2-158, 講演日: 平成21年3月18日

5) S. Hashi, F. Kamisaka, S. Yabukami, H. Kanetaka, K. Ishiyama, K. I. Arai: Integration of excitation coil