表 1　磁性材料の電気・磁気特性

	初透磁率 (μi)	キュリー温度 (Tc)	飽和磁束密度 (Bs)	残留磁化 (Br)	保磁力 (Hc)
Ni-Zn ferrite	1,500	100	0.3	0.11	16.0

図 2 に Q 値の周波数特性を示す。Q 値が最も高くなる周波数帯に共振周波数を設定しマーカとした(以後、微小フェライトマーカと呼ぶ) 。

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 Fe 系アモルファスリボン (Metglas 2605SA1　表 3-2 参照)と、Co 系アモルファスリボン (Metglas 2705M、2714A 表 2 参照)2 種類の計 3 種類を用意した。アモルファスリボンを積層する際に、厚さ 10μm の極薄両面テープ（寺岡製作所製、7070w）を接着・絶縁層に使用した(図 1 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。

まず、これらのアモルファスリボンの周波数特性を調べるために、5mm×5mm および 5mm×10mm に切り出し、それぞれ 1、5、10 枚ずつ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で出来た巻き数の異なる(銅線を 5mm×5mm 用は 100、200、300 回巻き、5mm×10mm 用は銅線 300、400、500 回巻き) コイル枠（図 3）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。形状・積層数に関係なく Co 系アモルファスリボンである 2705M が高い値を示した。コイル枠の巻き数を変えたときも同じように 2705M が高い値を示した。

Q 値を上げるためには、アモルファスリボンの積層

表 2　アモルファスリボンの電気・磁気特性

	初透磁率 (μi)	キュリー温度 (Tc)	飽和磁束密度 (Bs)	残留磁化(Br)	保磁力 (Hc)
Fe(2605 SA1)	15,000	415	1.6	1.30	2.0
Co (2714A)	30,000	365	0.8	0.70	1.2
Co (2705M)	170,000	225	0.6	0.52	0.2

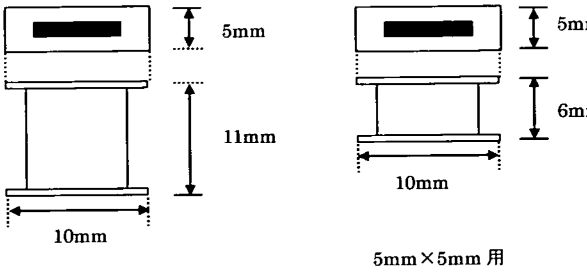


図 3　プラスチック製コイル枠の概略図

枚数を増やすか、コイルの銅線の巻き数を増やす 2 通りがあるが、目安としたマーカサイズ以下にするため、ここでは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。5mm 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 0.1mm×2 程度の厚みが増すことになる。そのため Co 系アモルファスリボンを 5mm×3mm と 5mm×4mm に切り出し、20 枚に積層した磁心を 2 つずつ用意した。この磁心に銅線を直接 100 回および 200 回巻きコイルとし、周波数特性を図 3-7 に示した厚みは 100 回巻きで、1.3mm、200 回巻きで 2.6mm となった。Q 値の最高値（カッコ内にその時の周波数[kHz]）と共にコイル全体の厚さを表 3 に示した。この中では、磁心が 5mm×4mm のサイズに銅線を 100 回巻いた磁心が、前述したサイズの条件に合致したのでこれをマーカのコイル部に使用した。

位置検出性能の比較用として、直径 3 mm 長さ 10 mm の円柱形 Ni-Zn フェライト磁心に線径 0.1mm の銅線を 100 回巻いてコイルとした。共振周波数を今回作製した小型マーカの共振周波数域になるようにチップコンデンサを選び、銅線の両端に取り付けマーカとした(以後、3mm 径フェライトマーカと呼ぶ)。3mm 径フェライトマーカと前述した 2 つのマーカとの磁性体部分のみの体積比は、微小フェライトマーカで 1/18、アモルファスマーカで 1/8 となっている。全てのマーカの仕

表 3　形状・巻き数の違いによる最大 Q 値とコイル全体の厚さ，()内は最大 Q 値を示した時の周波数［kHz］

形状	巻き数	Q 値	厚さ
5×3[mm]	100 回	26　(400)	1.3mm
	200 回	39　(250)	2.6mm
5×4[mm]	100 回	30　(380)	1.3mm
	200 回	45　(250)	2.6mm

様を表4にまとめた。

表4　作製した各LCマーカの使用

	3㎜径フェライト	微小フェライト	アモルファス積層リボン
共振周波数 [kHz]	330	405	362
測定周波数 (低周波) [kHz]	328	397	355
測定周波数 (高周波) [kHz]	333	413	370
チップコンデンサ容量[pF]	2200	4700	3300
Q値	68.5	42.5	29.5

C. 試作したLCマーカの性能評価および考察

C-1）評価方法

LCマーカの移動には、図4に示すように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マーカを移動精度0.1 mm以下での移動が可能である。

試験手順について示す。まず、LCマーカを配置せずにバックグランド電圧を取得する。この時、中心のサーチコイル Ch13 に検出される誘起電圧が 39mV になるように各ＬＣマーカの測定周波数に対して励磁コイルにかける電圧を調整した。次に図5に示すようにLC

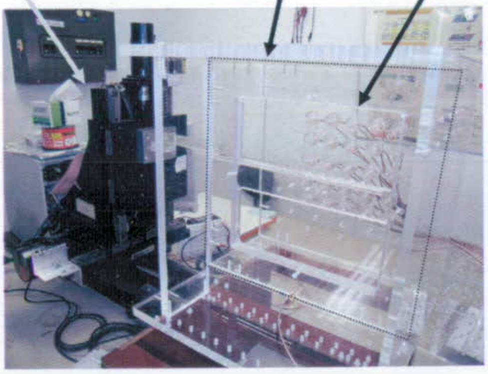


図4　三次元LCマーカ配置システムと励磁コイル・検出コイルアレイ

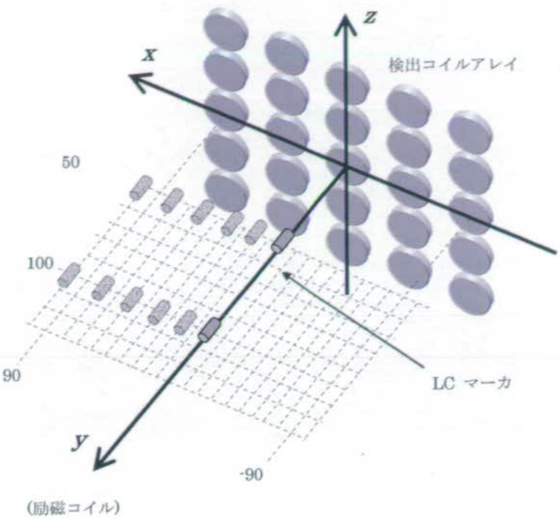
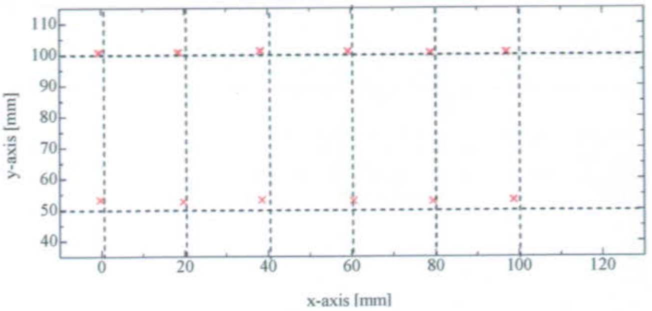


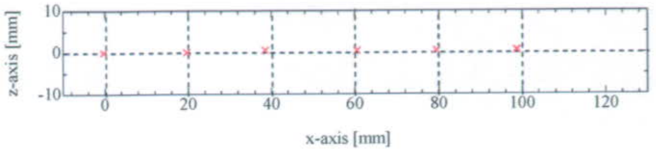
図5　LCマーカと検出コイルの配置図

マーカを座標(0, 50, 0)（単位はいずれも mm ，尚以降では座標についての単位 mm は省略する）に配置し、この位置を基準位置としてここからシステムで x 軸、正方向に 20mm 間隔で x＝100 (100, 50, 0)まで移動させ、それぞれの位置(計 6 点)において静止状態で 100 回の連続測定を行った。マーカの基準位置を(0, 100, 0)に設置した時も x 軸、正方向に 20mm 間隔で x＝100 (100, 100, 0)まで移動させ、同様に測定を行った。

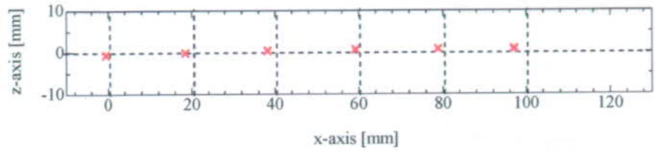
従来の 3mm 径フェライトマーカの位置検出結果を図5に示す。y＝50 では、x 方向に移動させた6点全てにおいて、設置位置に対し 3mm 程度のずれが見られる。y＝100 では、ほぼ設置位置と検出結果が重なる。ただしマーカが中心から遠ざかるにつれ x 方向の検出位置が内側にずれる傾向が見られた。この中で(0, 50, 0), (0, 100, 0)におけるばらつきを図6の拡大図に示した。(0, 50, 0)では、x、y、z 方向全てで 0.07mm 以下のばらつきとなっている。また(0 , 100 , 0)では、0.5mm 以下のばらつきとなっている。これらの結果を参照基準として、次節の微小フェライトマーカ、アモルファスマーカの位置検出結果と比較を行う。



(a) xy 平面



(b) xz 平面，(0, 50, 0)

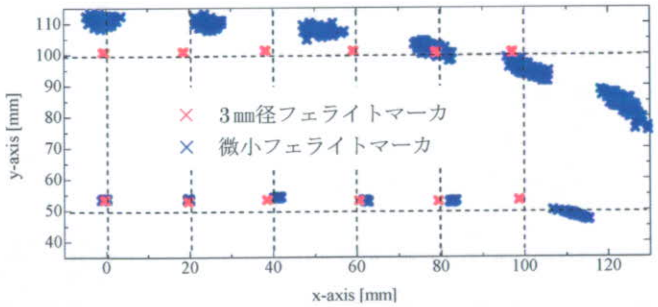


(c) xz 平面，(0, 100, 0)

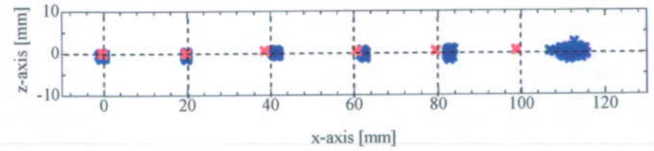
図 5　3mm 径フェライトマーカの位置検出結果

C-2) 微小フェライトマーカの位置検出結果

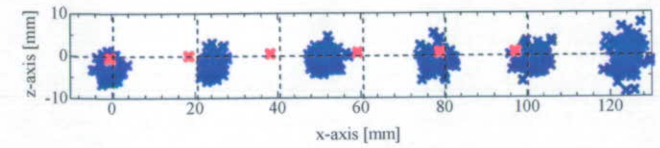
微小フェライトマーカの位置検出結果を、先ほど示



(b) xy 平面

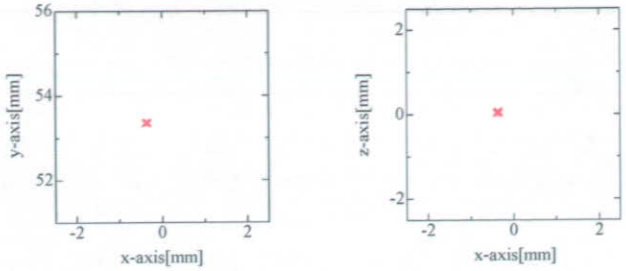


(c) xz 平面，(0, 50, 0)

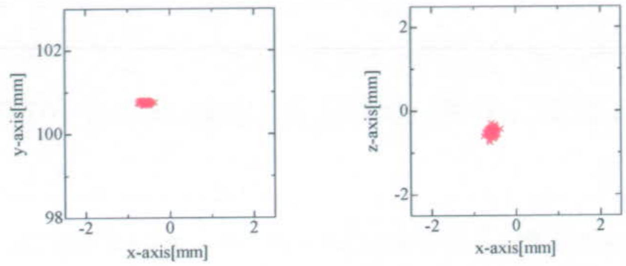


(d) xz 平面，(0, 100, 0)

図 7　微小フェライトマーカの位置検出結果



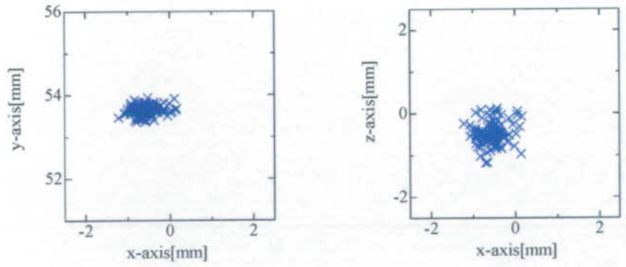
(a)　(0, 50, 0)



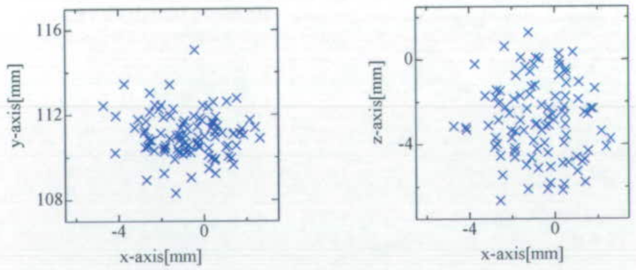
(b)　(0, 100, 0)

図 6　図 5 中の(0, 50, 0)及び(0, 100, 0)における検出結果の拡大図

した 3 ㎜径フェライトマーカの結果と共に、図 7 に示す。y=50 では、x=0、20 は 3mm 径フェライトマーカの位置検出結果と重なる結果となった。しかし x=40 以上では、3mm 径フェライトマーカよりも外側に位置が検出されている。y=100 では 3mm 径フェライトマーカの結果及び実際の設置位置に対し、かなりずれており、マーカの設置位置が中心から遠くになるにつれて

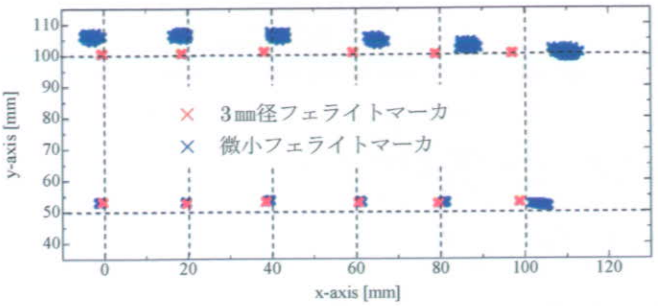


(a)　(0, 50, 0)

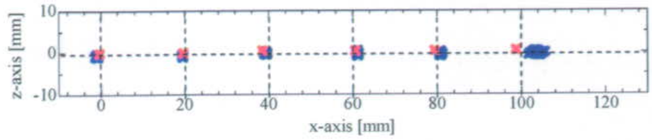


(b)　(0, 100, 0)

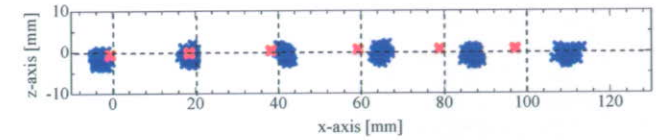
図 8　図 7 中の(0, 50, 0)及び(0, 100, 0)における検出結果の拡大図



(c) xy 平面



(d) xz 平面, (0, 50, 0)



(e) xz 平面, (0, 100, 0)

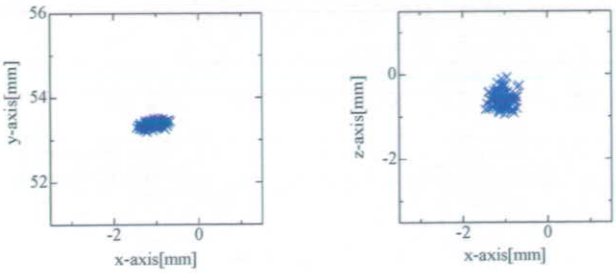
図 9 アモルファスリボンマーカの位置検出結果

扇形に広がっていることがわかる。

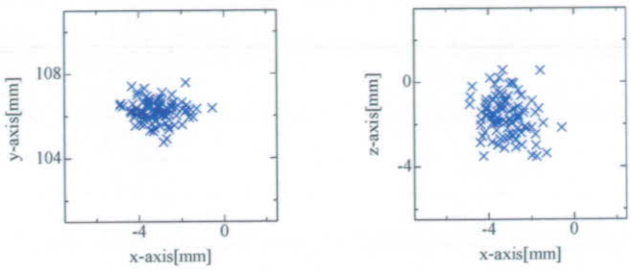
次に、(0 , 50 , 0)、(0 , 100 , 0)におけるばらつきを図 8 の拡大図に示した。(0 , 50 , 0)では、xz 方向で 1.5mm 程度、y 方向で 1.0mm 程度までばらつきの範囲が広がっている。また(0 , 100 , 0)では、10mm 程度までばらつきの範囲が広がっている。

C-3) アモルファスリボンマーカの位置検出結果

C-2 と同様にアモルファスマーカを用いた場合の位置検出結果を、3 ㎜径フェライトマーカの結果と共に、図 4-7 に示す。y=50 では、x=0～80 の範囲で 3mm 径フェライトマーカとほぼ重なる結果となった。しかし(100 , 50 , 0)では、3mm 径フェライトマーカの結果より外側に位置が検出される結果となっている。y=100 では 3mm 径フェライトマーカの結果に対し、微小フェライトマーカほどではないが、マーカの設置位置が中心から遠くになるにつれて扇形に広がる傾向が見られる。次に、(0 , 50 , 0)、(0 , 100 , 0)の位置検出結果のばらつきを図 4-6 に示した。(0 , 50 , 0)では、x, y ,z 方向全てにおいて 1mm 程度までばらつきの範囲が広がっている。また(0 , 100 , 0)では、5mm 程度までばらつきの範囲が広がっている。



(a) (0, 50, 0)



(b) (0, 100, 0)

図 10 図 9 中の(0, 50, 0)及び(0, 100, 0)における検出結果の拡大図

C-4) 位置検出性能の比較

各マーカにおける(0, 50, 0)、(0, 100, 0)の検出位置の平均値と、ばらつきの標準偏差を表 5, 6 に示す（Ave.:検出位置の平均, Dev.:ばらつきの標準偏差, R:空間全体のばらつきの標準偏差）。(0, 50, 0)では、3 つのマーカ共に y 方向に 3mm 程度のずれが見られる。サーチコイル径のサイズの影響によるもので、コイル径を小さくすることでずれが抑えられることがシミュレーションの結果より予測されている。(0, 100, 0)では、微小フェライトマーカ、アモルファスリボンマーカ共に y 方

表 5 設置位置(0, 50, 0)でのばらつきと標準偏差

(0, 50, 0)	x=0		y=50		z=0		R
	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Dev.
3 ㎜径フェライトマーカ	−0.4	0.01	53.0	0.004	0.01	0.01	0.02
微小フェライトマーカ	−0.5	0.29	53.1	0.12	0.5	0.28	0.42
アモルファスマーカ	−1.1	0.17	53.4	0.07	−0.6	0.18	0.26

表 6　設置位置(0, 100, 0)でのばらつきと標準偏差

(0,100,0)	x=0		y=100		z=0		R
	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Dev.
3 mm径フェライトマーカ	-0.6	0.07	100.8	0.03	-0.5	0.08	0.11
微小フェライトマーカ	-3.2	1.60	111.0	1.05	-2.8	1.80	2.63
アモルファスマーカ	-0.6	0.84	106.2	0.50	-1.6	0.94	1.35

向に大きなずれが見られる。

検出位置と設置位置との全体のばらつきの範囲の標準偏差 R について、3mm 径フェライトマーカと他の 2 つのマーカとを比較する。3mm 径フェライトマーカが (0, 50, 0)で 0.02 であるのに対し、微小フェライトマーカは 0.42 で 21 倍、一方アモルファスリボンマーカは 0.26 で 13 倍であった。(0, 100, 0)では 3mm 径フェライトマーカは 0.11 であるのに対し、微小フェライトマーカは 2.63 で 24 倍、一方アモルファスマーカは 1.35 で 12 倍であった。この結果を踏まえて、各マーカ使用時の SN 比の比較を行った。SN 比は 25 個のサーチコイルで検出される誘起電圧の二乗和平均(式 1)とノイズの比を取った。3mm 系フェライトマーカと各マーカの SN 比を図 11 に示す。3mm 径のフェライトマーカに比べると、微小フェライトマーカは 1/24 程度、アモルファスマーカは、1/14 になっている。これはマーカの体積の比に近い値を示し、位置検出結果のばらつきの比にほぼ反比例する値となっている。よってマーカの励磁界の増加、周波数帯域の高周波化など、システムのＳＮ比を改善することで検出性能の高精度化が可能であると考えられる。

D. 結論

LC 共振型磁気マーカの小型化について、微小フェライト材およびアモルファスリボン材の 2 種類の磁性材

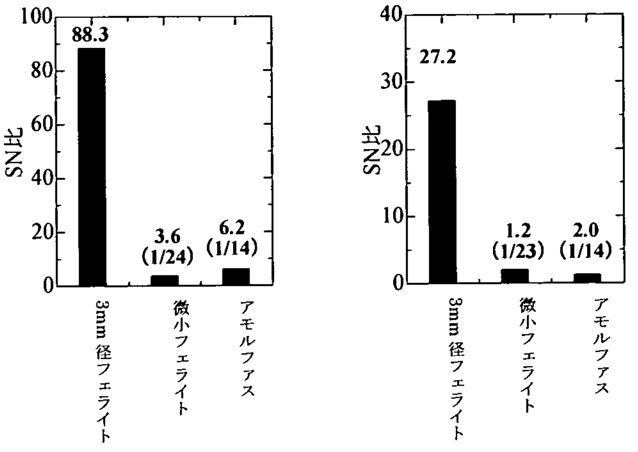


図 11　(0, 50, 0)及び(0, 100, 0)における SN 比の比較

料を用いて検討を行った。以下にマーカの小型化実現に向けて得られた知見をまとめる。

(1)直径 1mm、長さ 5mm の Ni-Zn フェライトを磁心材と使用したマーカを使い位置検出を行ったところ、サーチコイルから 50mm 程度の範囲で位置検出精度 4mm、検出位置のばらつき 4mm^3 程度であった。

(2)積層アモルファスリボンを磁心材と使用したマーカを使い位置検出を行ったところ、サーチコイルから 50mm 程度の範囲で位置検出精度 4mm、検出位置のばらつき 1mm^3 程度であった。

(3)2 種の小型マーカ検出時のばらつきおよび SN 比について、検出位置精度の比較基準とした 3mm 径フェライト磁心を使ったマーカと比べたところ、磁心材の体積比に対して位置精度やばらつきは反比例の関係にあることが分かった。

E. 研究発表

1. 論文発表

① 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," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 142, No. 2, pp. 520-527 (2008).

② 薮上　信，小笠原浩太，齋藤秀樹，枦修一郎，豊田征治，岡崎靖雄，荒井賢一
多点ワイヤレス磁気マーカによる指先のモーションキャプチャシステム
Journal of the Magnetics Society of Japan,

vol. 31, No. 6, pp. 439-444, 2007.

2. 学会発表

① 薮上 信，金高弘恭，枦修一郎，荒井賢一

平面型ワイヤレス磁気マーカの検討

第31回日本応用磁気学会学術講演会, 13aB-5, (東京)

2007.9.11-14

F．知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3.その他

該当なし

厚生労働科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）
Ⅱ-4　分担研究報告書

ワイヤレス磁気マーカの位置検出精度向上に関する研究

分担研究者　　荒井　賢一　　（財）電気磁気材料研究所・理事

研究要旨
LC 共振型磁気マーカを用いた三次元位置検出システムのさらなる検出位置精度向上のための指針を得ることを目的とし、LC マーカの姿勢に対する検出性能評価や検出コイル径小型化が検出精度に及ぼす効果について詳細な検討を行ったところ、検出コイルから 60mm 程度の近距離においては、検出位置とマーカの設置位置との誤差を 1mm 程度まで小さくできたが、それ以上の距離では効果が確認できなかった。また数値解析の手法により、理論的な側面から実験結果の妥当性が確認された。

A. 研究目的

これまでの検討結果より、検出コイルから 60～140mm の空間において位置精度 2mm 立方以下、ばらつき 1mm 立方以内を達成した。検出精度向上のため、LC マーカの方向を変化させて位置検出を行い、本システムの性能を評価した。また、検出コイルの径を小さくすることで位置精度の向上が見込まれるという数値解析結果を基に、実際に径を小さくした検出コイルを製作し検討を行った。さらに数値解析により、検出コイルの配置について精度向上のための検討を行った。

B. LC マーカ駆動および位置検出方法

LC マーカは図 1 に示すように、直径 3mm、長さ 10mm のフェライトコアに巻線を施したコイルとチップコンデンサを直列に接続しただけのシンプルな構造であり、LC 共振回路を構成している。LC マーカに交流磁界を印加すると、コイル部分に鎖交する磁束により誘導起電力が発生する。これにより、LC マーカに巻かれたコイルに誘導電流が流れ、この誘導電流により誘導磁界が発生する。ここで、外部励磁磁界の周波数が LC マーカの共振周波数付近であれば、LC 共振により誘導電流は極大となり、大きな磁界を発生させられる。

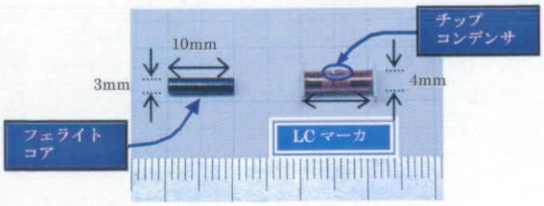
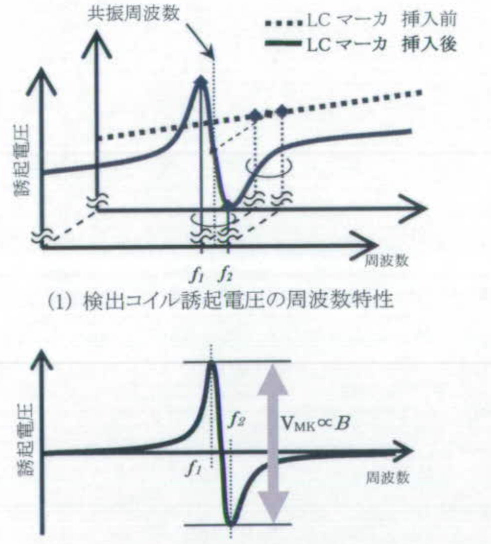


図 1　試作した LC マーカ

LC マーカが発する磁界は、マーカを駆動するためにかけた励磁磁界とあわせて検出されるため、直接計測するのは困難である。そこで、以下の方法で間接的に求める。検出コイルを 25 個格子状に並べた平面（以降検出コイルアレイと呼ぶ）と正対するように置かれた励磁コイルに挟まれた測定空間内に、図 2 に示すように LC マーカを挿入する前と後で励磁をそれぞれ行い、各検出コイルに誘起される電圧を取得する。それらの電圧の差分を取ることで、LC マーカの発した磁界の誘



(1) 検出コイル誘起電圧の周波数特性

(2) LC マーカから発生した磁界の誘起電圧への寄与分

図 2　LC マーカが発した磁界による誘起電圧の計測

起電圧への寄与分（図 2(2)の"V_{MK}"）を求めることができる。この測定値を用いて、後述する計算で位置および方向を算出する。

本システムでは、LC マーカから発生する磁界をダイポール磁界と近似している。LC マーカの位置・方向および磁気モーメントを変数となり、計 6 自由度となる。LC マーカの位置座標については, 検出コイルアレイ中央にある検出コイルの中心点を原点とし、x, y, z 軸を図 3 のように取った。磁気モーメントの方向が LC マーカの方向に対応する。φ は磁気モーメントと z 軸のなす角、θ は磁気モーメントを x-y 平面に射影したベクトルと x 軸のなす角、M は磁気モーメントの大きさである。これらの変数は非線形最小二乗法による計算を Gauss－Newton 法によって最適化することにより解を求めた。ダイポール磁界より発生する磁界ベクトルを表す式を式 (1) に、また、最小二乗法により解を求める式を式 (2) に示す。

$$\vec{B}_{c(i)}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi}\left\{-\frac{\vec{M}}{r_i^{3}} + \frac{3\left(\vec{M}\cdot\vec{r_i}\right)\cdot\vec{r_i}}{r_i^{5}}\right\} \qquad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{6} 2\sum_{i}^{n} \frac{\partial \vec{B}_{c(i)}}{\partial p_j}\frac{\partial \vec{B}_{c(i)}}{\partial p_k}\Delta p_k = 2\sum_{i}^{n}\frac{\partial \vec{B}_{c(i)}}{\partial p_j}\left(\vec{B}_{m(i)} - \vec{B}_{c(i)}\left(\vec{p}\right)\right) \quad ,(j=1,2,\ldots 6) \qquad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l}\vec{p} = (x, y, z, \theta, \phi, M) \\ \quad = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)\end{array}\right)$$

C. 検出コイルのサイズを変えた位置検出

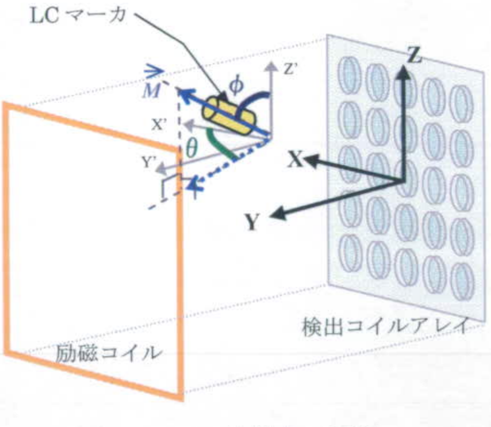


図 3 マーカの姿勢角の定義

これまで使用していた検出コイルの直径は 25mm であった。今回新たに直径 10mm の検出コイルを製作し位置検出を行い、これまでの結果と比較した。-80≦x≦80, 60≦y≦140, z= 0（単位は mm）の x-y 平面内で、LC マーカを配置システムにより x , y 軸方向とも 20mm 間隔で移動させ、LC マーカを静止させた各点 100 回連続測定を行った。なお、LC マーカの姿勢角は θ＝φ=90° とした。

図 5 より、検出コイルを直径 10mm にしても問題なく検出できることがわかる。検出位置のばらつき量は、設置位置との距離の標準偏差で表し、直径 25mm のとき 0.6mm 以内、直径 10mm のとき 0.7mm 以内であった。図 6 より、y=60 では、検出位置が y 軸方向で 1mm 弱設置位置に近づいていることがわかる。これは、前述の数値解析で予想されていた通りの結果となったが、y=100、140 では同様の結果は得られなかった。

D. 数値解析による高精度化の検討

さらなる高精度化のために、検出コイルの配置角度について数値解析を用いた検討を行った。ここでは、マーカは大きさを持たないダイポール磁界と仮定し、センサはコイル円内に一様に分布した点のセンサの集合とし、センサに得られる信号は、それらの平均値を用いた。

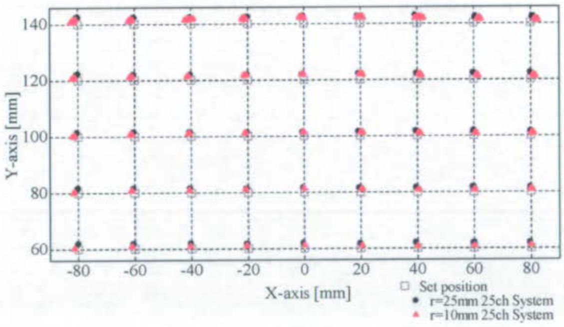
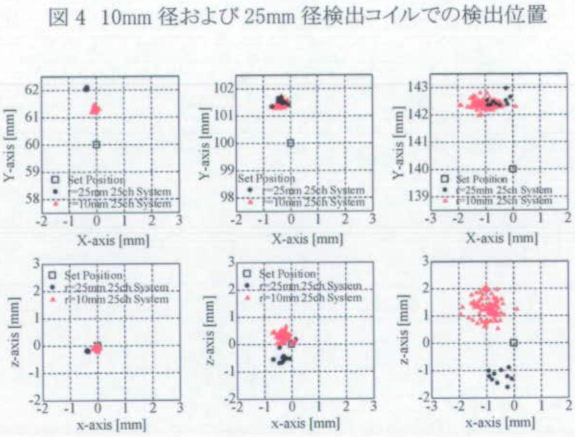
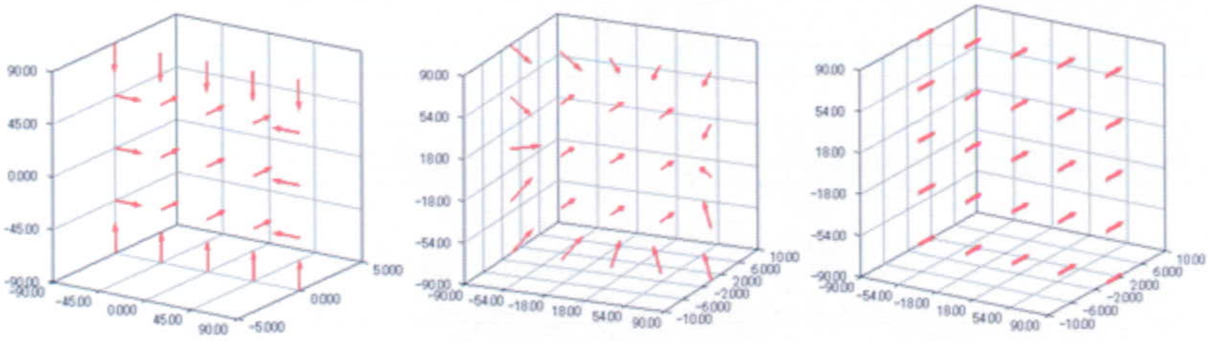


図 4 10mm 径および 25mm 径検出コイルでの検出位置



(1) (0 , 60 , 0)　(2) (0 , 100 , 0)　(3) (0 , 140 , 0)

図 5 検出位置の拡大図（X=0 の 3 点）



(a)外縁の 16 個を内側に 90° 傾けた　(b)外縁の 16 個を内側に 45° 傾けた　(c)実験1・2と同じ状態

図 6　仮想位置検出を行った各検出コイルの向き

このような条件の下、-80≦x≦80，60≦y≦140，z= 0 の x-y 平面内で、x，y 軸方向とも 20mm 間隔でマーカを移動させ、姿勢角 φ=90°、θ を 0°～90° の間で 30° 刻みで変化させて仮想的に位置検出を行った。なお、検出コイルの向きは、図 7 の(a), (b), (c)に示す 3 通りに変化させ、検出コイルの直径を 10mm と 25mm の 2 通りについて検討した。その結果、姿勢角 θ の変化に対する算出位置のばらつきが最小となったのは、直径 25mm では (c)パターンであり、直径 10mm では(b)・(c)パターンがほぼ同じであった。すなわち、今回の検討では、検出コイルを傾けることで得られる効果は薄いということが判った。

E. 結論

検出コイル小径化による検出位置精度の向上を目指して、新たに 10mm 径の検出コイルを試作し、従来の 25mm 径の検出コイルに対する位置検出性能の比較を行った。10mm 径の検出コイルを用いたシステムにおいて、評価範囲は-80≦x≦80、60≦y≦140、z=0 の x-y 平面上を x・y 軸方向とも 20 mm 間隔とし、LC マーカの円柱軸が励磁コイルおよび検出コイルアレイに対して垂直の場合（θ=φ=90°）のみの検討を行った。その結果、y=60 において、検出位置と LC マーカ宇の設置位置との距離を平均 0.80mm 小さく、合計 1.17mm まで小さくできたが、y=100、140 では効果が確認できなかった。また、検出位置のばらつきは、10mm 径、25mm 径の検出コイルとも最大±0.7mm 程度と同等であった。

また、マーカをダイポール磁界と仮定した、数値解析を行い、検出位置のズレに対する検出コイルの直径の影響について検討した結果、検出コイルの直径をさらに小さくすれば、実際に測定される誘導磁界と理論値の差が小さくなり、検出位置の誤差を抑えられる見通しが得られた。

F. 研究発表

1．論文発表

① 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," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 142, No. 2, pp. 520-527 (2008).

② 薮上　信，小笠原浩太，齋藤秀樹，枦修一郎，豊田征治，岡崎靖雄，荒井賢一
多点ワイヤレス磁気マーカによる指先のモーションキャプチャシステム
Journal of the Magnetics Society of Japan, vol. 31, No. 6, pp. 439-444, 2007.

2. 学会発表

① 薮上 信，金高弘恭，枦修一郎，荒井賢一
平面型ワイヤレス磁気マーカの検討
第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 13aB-5, (東京) 2007.9.11-14

② 薮上　信，齋藤秀樹，渡邉　尚，荒井賢一
高周波キャリア型薄膜磁界センサの高感度化
電気学会マグネティックス研究会，MAG-07-49（南紀白浜）2007. 7.12

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3.その他

該当なし

Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書　籍　名	出版社名	出版地	出版年	ページ

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Hashi S, Toyoda M, Yabukami S, Ishiyama K, Okazaki Y, Arai I K, Kanetaka H,	Wireless magnetic motion capture system using multiple LC resonant magnetic markers with high accuracy.	Sensors and Actuators	24 A 142	520–527	2008
Kanetaka H, Suzuki A, Tomizuka R, Urayama S, Takano-Yamamoto T	Development of a new ultra-precision-polished pure titanium mirror for dental treatment	Interface Oral Health Science 2007		355-356	2007
Tomizuka R, Kanetaka H, Shimizu Y, Suzuki A, Urayama S, Takano-Yamamoto T	Effects of initially light and gradually increasing force on orthodontic tooth movement	Interface Oral Health Science 2007		181-182	2007
Shimizu Y, Okayama K, Kano M, Kanetaka H, Kikuchi M	Osteoclast-mediated bone remodeling in guided bone regeneration using graft materials	Interface OralHealth Science2007		329-334	2007
Urayama S, Kanetaka H, Shimizu Y,	The effects of orthopedic forces with self-contained SMA appliance on cranial	Interface Oral Health Science 2007		353-354	2007

Suzuki A, Tomizuka R, Takano-Yamamoto T	suture in rat				
藪上 信, 小笠原浩太, 齋藤秀樹, 枦修一郎, 豊田征治, 岡崎靖雄, 荒井賢一	多点ワイヤレス磁気マーカによる指先のモーションキャプチャシステム	Journal of the Magnetics Society of Japan	31	439-444,	2007

Ⅳ．研究成果の刊行物

Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
ELSEVIER
Sensors and Actuators A 142 (2008) 520–527
SENSORS AND ACTUATORS A PHYSICAL
www.elsevier.com/locate/sna

Wireless magnetic motion capture system using multiple LC resonant magnetic markers with high accuracy

Shuichiro Hashi [a,*], Masaharu Toyoda [a], Shin Yabukami [b], Kazushi Ishiyama [c], Yasuo Okazaki [a], Ken Ichi Arai [d], Hiroyasu Kanetaka [e]

[a] *Department of Materials Science and Technology, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan*
[b] *Department of Electrical Engineering and Information Technology, Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537, Japan*
[c] *Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*
[d] *The Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 2-1-1 Yagiyama-minami, Taihaku-ku, Sendai 982-0807, Japan*
[e] *Graduate School of Dentistry, Tohoku University, 4-1 Seiryo-machi, Aoba-ku, Sendai 980-8575, Japan*

Received 22 January 2007; received in revised form 17 August 2007; accepted 12 September 2007
Available online 26 September 2007

Abstract

The present paper reports the principle of a wireless magnetic motion capture system that uses multiple LC resonant magnetic markers and demonstrates its application. Small and lightweight markers (4 mm in diameter, 10 mm in length, and 0.63 g in weight) use a soft ferrite core and a coil, representing a minimal LC circuit with no battery, driven wirelessly by electromagnetic induction. The markers are given respective resonant frequencies ranging from 150 to 450 kHz. The magnetic signal of the marker is detected by a pick-up coil array consisting of 25 pick-up coils. The markers are excited by a superposed wave corresponding to all of the resonant frequencies, while the voltage signals induced through pick-up coils are separated in a frequency spectrum by FFT analysis. Regardless of the number of markers, the voltage amplitude for each resonant frequency can be easily obtained simultaneously, and thus the proposed system can detect multiple markers. In addition, the positional error of the system caused by a mutual inductance between the exciting coil and the LC marker was examined. The impedance change of the exciting coil due to a resonance of the LC marker was found to perturb the strength of the magnetic field used for marker excitation. The closer a marker approaches the exciting coil, the larger it becomes. This fluctuation induces an error in the marker signal, which is measured by the pick-up coils and is necessary for positional calculation. Then, considering the mutual inductance, a compensatory process was employed for positional calculation in order to improve the positional accuracy. After compensation, the absolute positional accuracy was determined to be less than 2 mm within 140 mm of the pick-up coil array.
© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Wireless magnetic motion capture system; LC resonant magnetic marker; Multi-position detection; Positional oriention al accuracy

1. Introduction

Close range motion capture is thought to be a useful technique for developing a next-generation virtual input device. For these applications, a small and lightweight wireless, wearable marker is strongly desired so that motions of the arms or fingers are not disturbed. The system must also be able to individually detect invisible objects in optically shielded space. However, in such cases, conventional and widely used optical methods cannot detect the marker. Magnetic motion capture systems are believed to satisfy these requirements. Several investigations to determine the position and orientation of a magnetic object or source have been reported [1–7]. However, conventional systems require that the magnetic object be large compared to the marker or that the marker contain electric wiring, in order to obtain a high SN ratio for the magnetic signal from the marker. Therefore, we previously proposed a wireless magnetic motion capture system using a magnetically coupled LC resonant magnetic marker [8–10]. In addition, we developed a wireless multi-marker detecting system using LC resonant magnetic markers [11]. The proposed system was shown to detect up to five markers simultaneously and to allow the approximate orientations and positions of the markers to be determined accurately to within 2 mm in a space located 100 mm from the pick-up coil array. However, a unique

* Corresponding author. Tel.: +81 58 293 2722; fax: +81 58 293 2722.
E-mail address: hashi@gifu-u-.ac.jp (S. Hashi).

0924-4247/$ – see front matter © 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.sna.2007.09.011

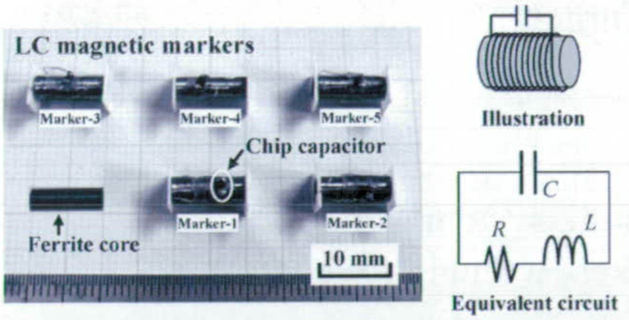


Fig. 1. Photograph and schematic diagram of the LC resonant magnetic marker.

detection error occurs with increased distance from the pick-up coil array.

In the present paper, we evaluate the positional and orientational accuracy of the proposed system with respect to the attitude angle of the markers. We herein examine the detection error and extend the detectable space with high accuracy for detecting the positions and orientations of the markers.

2. System component and signal acquisition

Fig. 1 shows a photograph and a schematic diagram of the LC resonant magnetic markers. The marker consists of a Ni–Zn ferrite core (3 mm in diameter and 10 mm in length) with a wound coil and a chip capacitor, representing an LC series circuit. Five markers, designed for resonant frequencies of 157, 202, 273, 323, and 440 kHz, respectively, were prepared. Table 1 shows the specifications of each LC marker, and the quality factor of each LC marker is approximately 70. A schematic diagram of the newly developed motion capture system is shown in Fig. 2. The system is composed of measurement equipment and a coil assembly consisting of an exciting coil and an array of newly designed pick-up coils. The pick-up coil array consists of 25 pick-up coils placed at intervals of 45 mm on an acryl board. Each coil consists of 40 turns of polyester enameled copper wire (PEW) wound around an acryl bobbin of 25 mm in diameter. An excitation voltage of 44 V_{p-p} is applied to the driving coil (10 turns of PEW around a 390 mm × 390 mm Teflon coil) and the markers are strongly excited at its resonant frequency by electromagnetic induction. However, the system becomes slow as the number of markers increases, owing to the time required to switch frequencies and make multiple measurements. Therefore, a superposed wave including all of the resonant frequency components of the markers is used to realize simultaneous excitation. As shown in Fig. 3, the induced voltage wave measured by the pick-up coils is analyzed in each frequency spectrum by

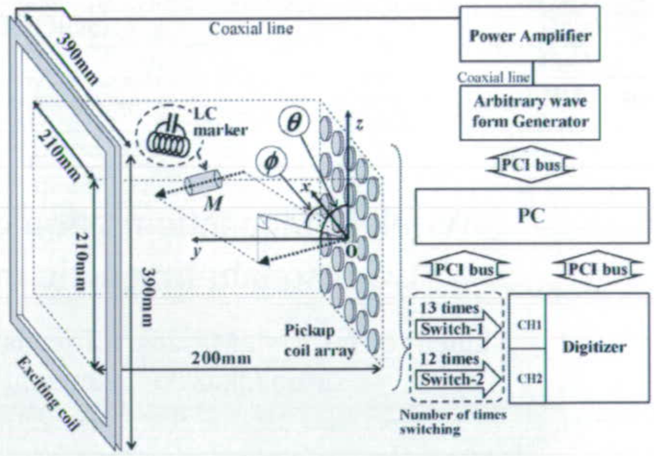


Fig. 2. Schematic diagram of the proposed wireless motion capture system for performance verification.

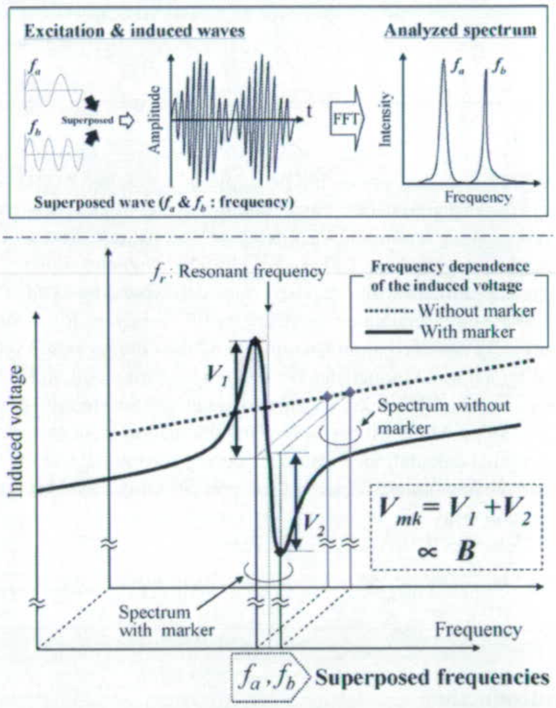


Fig. 3. Signal of LC marker acquisition technique (superposed wave excitation and FFT analysis).

FFT analysis. The spectra are first measured without the marker and are then measured with the marker. The induced voltage of the marker contributes V_{mk}, which can be obtained by vector subtraction of the amplitude of the spectrum without the marker

Table 1
Specifications of the LC resonant magnetic markers

	Marker-1	Marker-2	Marker-3	Marker-4	Marker-5
Resonant frequency [kHz]	157	202	273	323	440
Coil turns	350	300	270	220	120
Inductance [μH]	1184	914	734	510	140
Chip capacitor [pF]	910	680	470	470	910
Quality factor	70	70	70	65	72

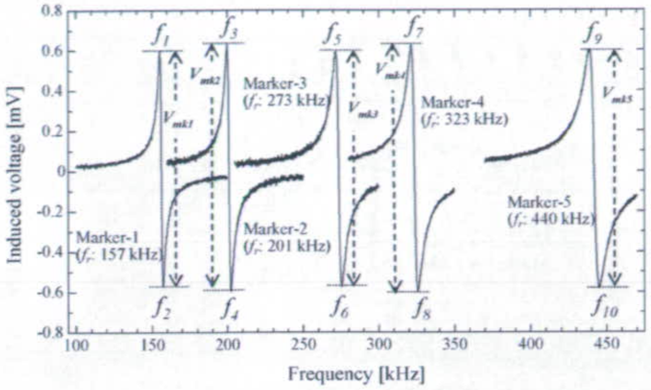


Fig. 4. Induced voltages due to the excitation of five markers.

from the amplitude of spectrum with the marker. The amplitude V_{mk} measured by each pick-up coil varies in proportion to the flux density B that the marker produces for the location of the pick-up coil. Fig. 4 shows the frequency dependence of the induced voltage from the markers. Sharp signals due to LC resonance of the markers were observed, and there was no influence on neighboring signals from the skirts of each signal. In practice, the superposed wave, which is composed of 10 frequencies corresponding to the upper and lower peaks (f_1–f_{10}), shown in Fig. 4 is used for excitation.

3. Calculation of position and orientation

The position and orientation of the markers is obtained by solving an inverse problem; more than six values (in this paper, 25 values are used) of the flux density at known locations are needed to determine both the position and orientation of the marker as the magnetic flux source (six degrees of freedom). To solve this problem, the flux density generated from the marker is considered as a magnetic dipole field. Based on this assumption, the position and orientation of the marker is calculated using the following equations (Eqs. (1)–(3)) and the nonlinear method of least squares, which effect an optimization using the Gauss–Newton method [12].

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

$$\vec{B}^{(i)}_{\mathrm{cal}}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ -\frac{\vec{M}}{r_i^3} + \frac{3(\vec{M}\vec{r}_i)\vec{r}_i}{r_i^5} \right\} \qquad (2)$$

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

Here, $S(\vec{p})$ is the objective function (the residual sum of squares), i is the coil number, n is the total number of coils, $\vec{B}^{(i)}_{\mathrm{meas}}$ is the measured flux density, $\vec{B}^{(i)}_{\mathrm{cal}}$ is the theoretical flux density that takes the magnetic dipole field into account, $\vec{p}$ is the parameters of the marker, $\vec{M}$ is the magnetic moment, and $\vec{r} = (x, y, z)$ is the position of the marker. Eq. (2) is the equation of an ideal dipole field expressed as a function of position and orientation. In the present paper, as shown in Fig. 2, position and orientation of the marker is expressed in polar coordinates: ϕ is the angle between the x-axis and the direction vector when the moment is projected onto the xy-plane, and θ is the angle between the direction of the moment and the z-axis.

4. Evaluation results of the system

4.1. Distance and attitude dependency of the markers

The position accuracy was verified experimentally for the system. As shown in Fig. 5, the positional and orientational accuracies were evaluated at attitude angles of $\phi = 90°$ (parallel to the y-axis) and $\phi = 135°$ when the five markers were lined up in five ranks at 20-mm intervals. The markers were swept from $y = 60$ to 140 mm in 10-mm steps along the y-axis in the xy-plane at $z = -50$, 0, and 50 mm, respectively. Fig. 6 shows the detected positions displayed in three dimensions. When all of the markers were parallel to the y-axis ($\phi = 90°$), approximately correct positions were obtained. A maximum positional deviation of approximately 5 mm was observed for markers located at (80, 140, 50), (80, 140, 0), and (80, 140, −50), whereas, as shown in Fig. 7, the intervals between adjacent markers were less than 3 mm in terms of relative positional accuracy. The relative error of the measured position of all of the points at intervals between adjacent markers was evaluated and expressed as an

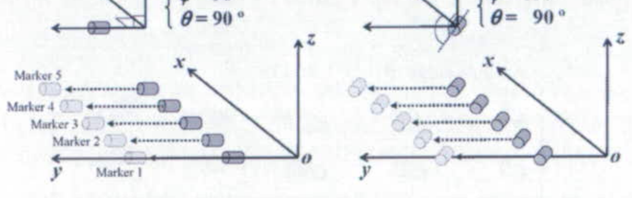


Fig. 5. Arrangement of the LC markers for evaluation of the system.

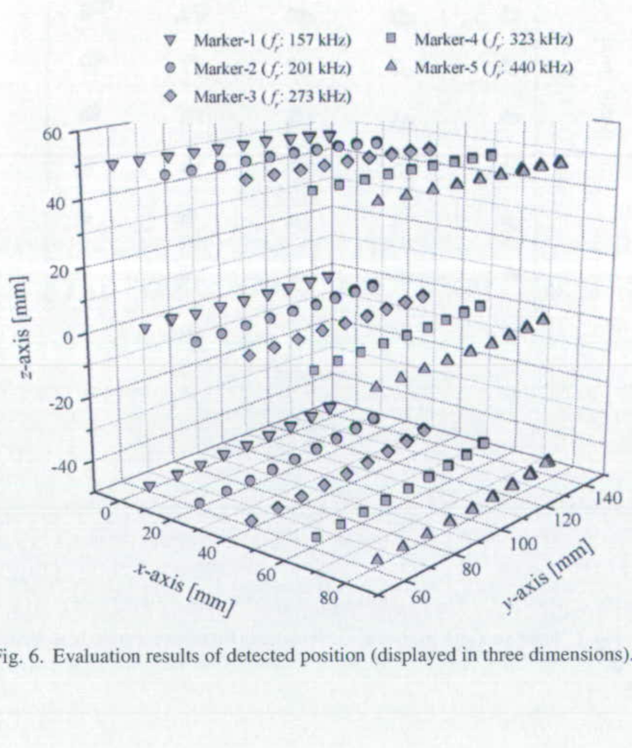


Fig. 6. Evaluation results of detected position (displayed in three dimensions).

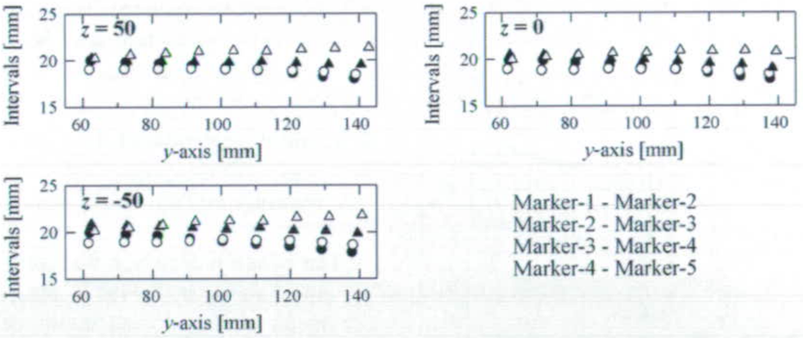


Fig. 7. Intervals between adjacent markers.

averaged value with a standard deviation. The results are as follows: 19.03 ± 0.88 mm at Mk1-2 (interval between Marker 1 and Marker 2), 18.79 ± 0.25 mm at Mk2–3, 19.88 ± 0.65 mm at Mk3–4, and 20.55 ± 0.41 mm at Mk4–5. The increase in the detection error for large distances is thought to be due to the relationship between the size and the arrangement of the exciting coil and the pick-up coil array.

Fig. 8(a) and (b) shows the detected positions and orientations, respectively, at $z = 0$ displayed in two dimensions at $\phi = 90°$ (parallel to the y-axis) and $\phi = 135°$, where each point represents 100 measurements at each marker position. The detected results for $\phi = 90°$ are represented by filled circles and those for $\phi = 135°$ are represented by open triangles. As shown in Fig. 8, at $\phi = 90°$, the solutions converged to a certain state of less than 1 mm in 100 measurements, and the position accuracies for each marker were within 2 mm. Approximately correct orientations were acquired at $\phi = 90°$ when the markers were located up to 100 mm from the pick-up coil array. In contrast, at $\phi = 135°$, the repeatable position and orientation accuracies become worse up to 5 mm and 5 degrees, respectively. Furthermore, the position and the orientation in detected values scatter in all directions for approximately 10–15 mm as the marker position is positioned more than 100 mm from the pick-up coil array. This is due to the fact that the marker is not excited efficiently at these positions, degrading the SN ratio, because the deviation angle between the exciting field vector and the normal vector of

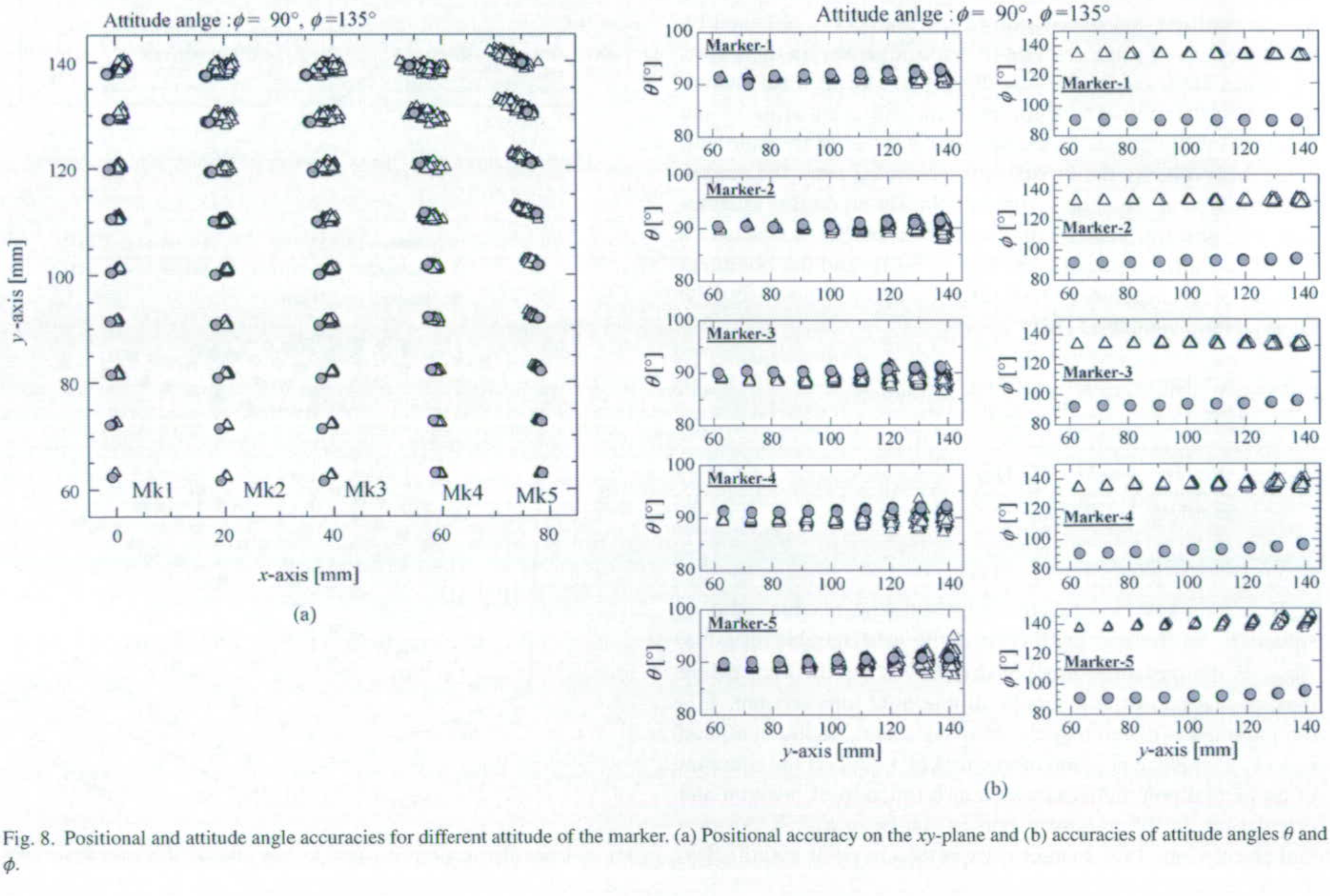


Fig. 8. Positional and attitude angle accuracies for different attitude of the marker. (a) Positional accuracy on the xy-plane and (b) accuracies of attitude angles θ and ϕ.

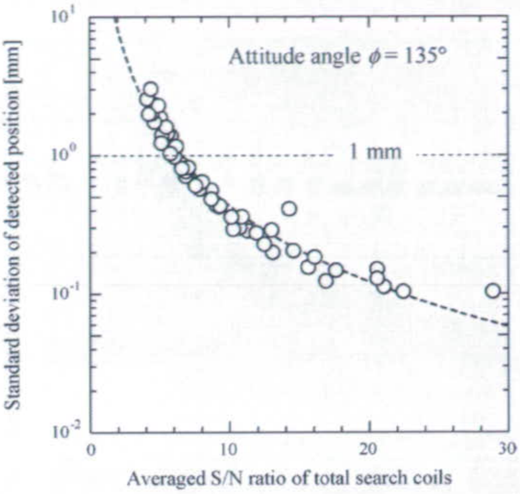


Fig. 9. Positional unevenness as a function of the S/N ratio.

the marker approach a right angle. In the xy-planes in which z is not equal to zero, since the actual positions of the marker with $\phi = 135°$ were departing from the center of pick-up coils array, the scattering tendency of the detected positions, as in Fig. 8, were observed.

Fig. 9 shows the relationship between the averaged SN ratio of the pick-up coil array and the repeatable position accuracy at an attitude angle of $\phi = 135°$ to indicate the amount of scatter in measured values. The noise level of the system was estimated to be 1 μV. The repeatable accuracy degraded as the averaged SN ratio decreased.

Overall, the results show that the system is capable of capturing the motion of the markers wirelessly and with an accuracy on the millimeter scale when the cylinder axes of the markers are parallel with the exciting field. However, the accuracy in detection will become worse as the deviation between the attitude angles and the exciting field increases.

Since the system using ac magnetic field, a nonmagnetic and a nonmetallic environment are required to realize high detection accuracy. However, because the system is free from the influence of the earth magnetic field the large-scale shield system is not needed. In such an environment, the effect of a living body as a dielectric to the system under the frequency less than hundreds of kHz is also considered to be very small. To give an example, it is considered that the system can be applied to the orthodontics and the dentofacial orthopedics, if a planer type marker will be realized. In such applications, the measurement range is enough to capture the swing of the jaw.

4.2. *Compensatory tracking of unique detection error*

In order to clarify the increase in the detection error of the markers for large distances from the pick-up coil array, the evaluation has been performed experimentally as follows. The position and orientation were detected for a single marker parallel to the y-axis. As shown in Fig. 10, the marker was swept from $x = -90$ to 90 mm and from $y = 60$ to 140 mm in 10-mm steps along the grid pattern in the xy-plane at $z = 0$ and 90 mm

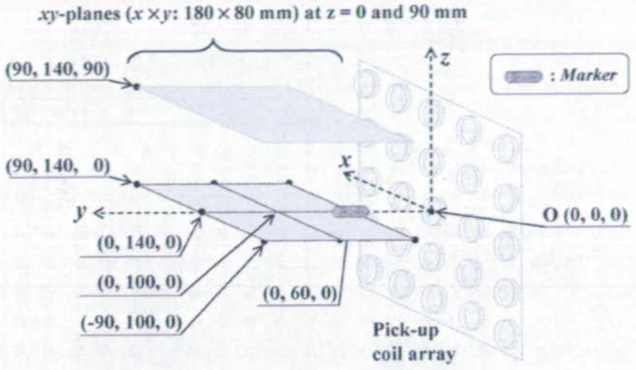


Fig. 10. Schematic diagram of the evaluation area.

(see Fig. 2 for the coordinate system). The movement of the marker was performed by a precision three-dimensional axial auto scanner with a positioning accuracy of less than 0.1 mm. The evaluation results are shown in Figs. 11 and 12. Each point represents 10 measurements at each marker position, where squares indicate actual positions, crosses indicate detected positions, and triangles indicate compensated positions, which will be described later. Good repeatable accuracy of within 1 mm is seen in Figs. 11(a) and 12(a). However, the detected positions were gradually deflected towards the y-axis along the broken lines in Fig. 11(a) (the center axis of the pick-up coil array) as the marker moved away from the pick-up coil array and approached the exciting coil. The deflection of the detected positions was also observed in the yz-plane at $z = 90$ mm, as shown in Fig. 12(c). In addition, Figs. 11(d) and 12(e) show that the deviation of the attitude angle ϕ in the xy-plane rotates anti-clockwise from 90° along the positive x-axis and rotates clockwise from 90° along the negative x-axis gradually up to approximately 10°. In the case of $z = 90$ mm, similar rotations of the attitude angle ϕ are also observed for the angle θ, as shown in Fig. 12(d) (see Fig. 13 for the illustration).

Maximum positional deviation distances of approximately 7 mm were observed for the markers located at (−90, 140, 0) and (90, 140, 0). As mentioned earlier, the increase in the detection error for large distances is thought to be due to the relationship between the size and arrangement of the driving coil and the marker. Therefore, in order to address this problem, the mutual inductance between the exciting coil and the marker at a resonant point was calculated at every position of the marker and tried to compensate for the position and the orientation of the marker. In practice, the impedance change of the exciting coil due to the mutual inductance is considered to perturb the excitation field. As a result, as shown in Figs. 11 and 12, the compensated positions and orientations of the markers, indicated by triangles, agree well with the actual positions and orientations of the marker indicated by squares.

In practical use, the compensatory tracking of the positional error in real time is required for the system. It is necessary to know the actual position of the marker with respect to the exciting coil in order to estimate the electromagnetic coupling between the before detection. This is clearly inconsistent. Also, because the electromagnetic coupling depends on the distance

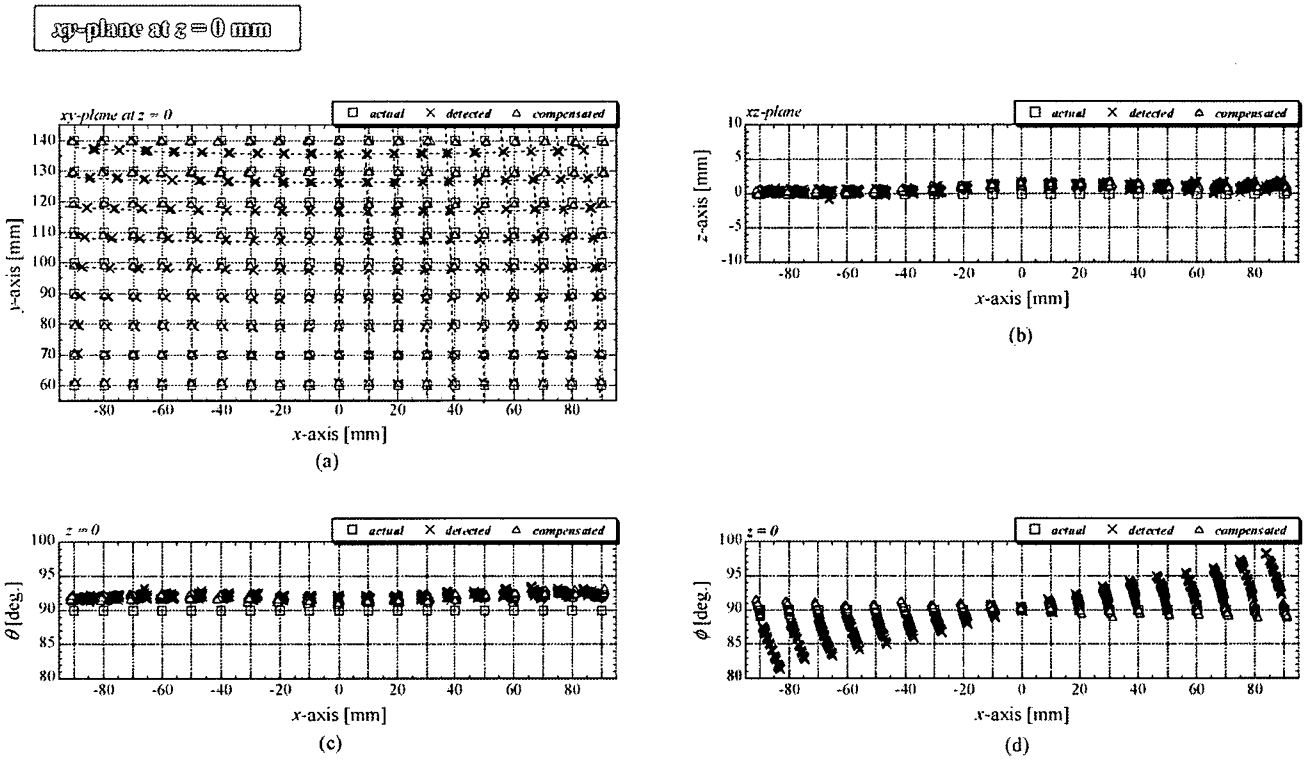


Fig. 11. Verification results of the positional accuracy at $z = 0$ mm displayed in (a) the xy-plane, (b) the xz-plane, and the attitude angles (c) θ and (d) ϕ.

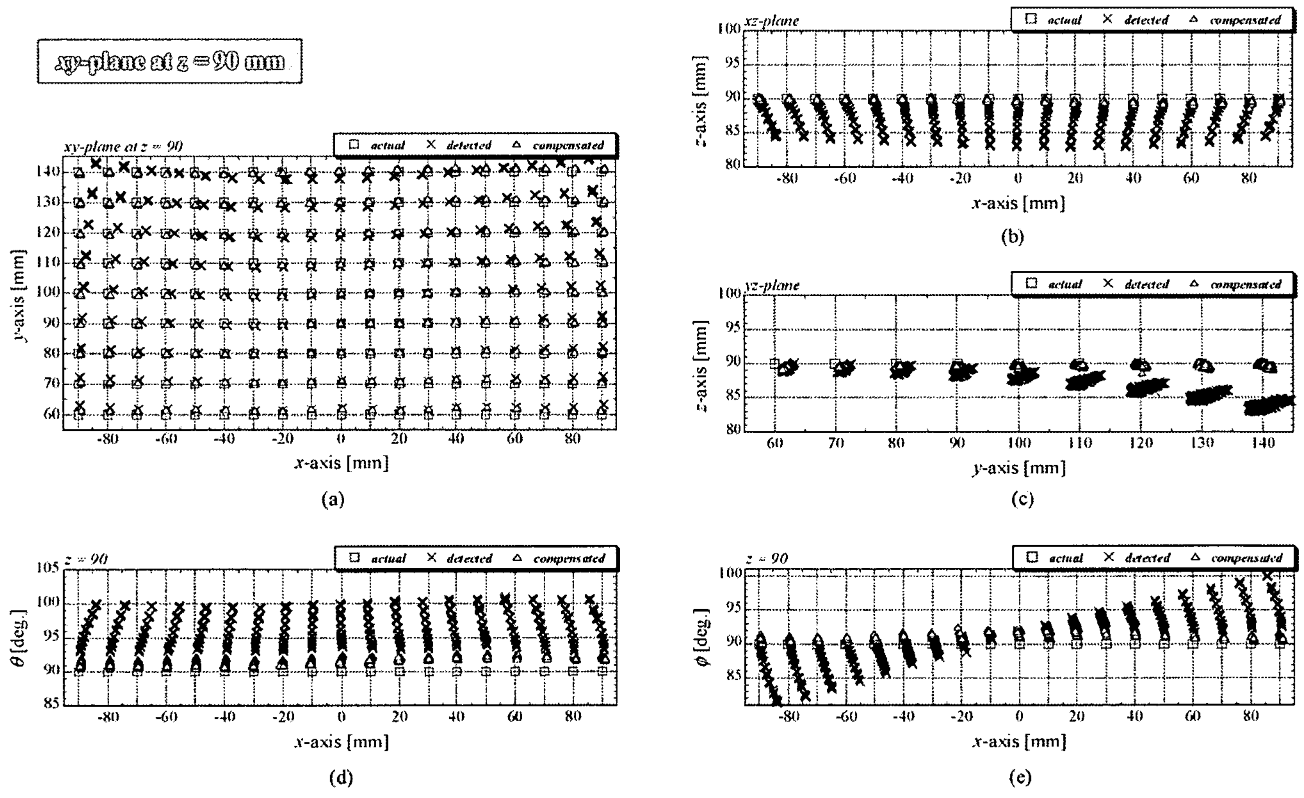


Fig. 12. Verification results of the positional accuracy at $z = 90$ mm displayed in (a) the xy-plane, (b) the xz-plane, and (c) the yz-plane, and the attitude angles (d) θ and (e) ϕ.

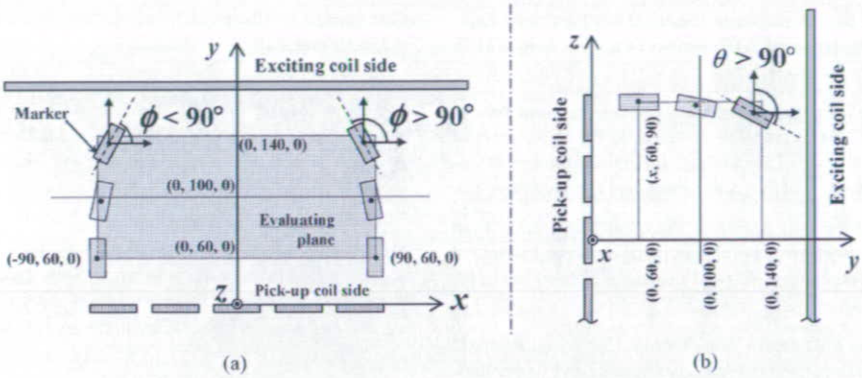


Fig. 13. Schematic diagram of the state of the detection error due to the influence of the mutual inductance. (a) A view of the *xy*-plane. (b) A view of the *yz*-plane.

and orientation of the LC markers to the exciting coil as mentioned before, the several excitation coils having different orientations are considered to be difficult to improve the influences of the electromagnetic coupling, although it will be useful for exciting the marker efficiently and improve the SN ratio of the system. However, the data of the coordinates comparatively close to the actual position, such as the initial values used in Eq. (1), can be employed. In addition, the equivalent circuit can shorten the calculation time. In practice, we adopted the compensatory tracking process for the system and evaluated the system. The results indicate that the accuracies of the compensation were approximately the same as the results shown in Figs. 11 and 12, and the supplementary time for the calculation was up to several milliseconds.

5. Conclusions

The performance of the proposed wireless magnetic motion capture system for five markers was evaluated. The LC resonant magnetic markers were given the individual resonant frequencies. The adoption of a superposed wave excitation and FFT analysis realized the simultaneous detection of multiple markers for the system. According to the attitude angle of the markers, the positional and orientational accuracies of the markers degrade as the distances of the markers from the pick-up coil array increase due to the decrease in the S/N ratio. The detectable accuracy of the markers was found to be less than 2 mm, and the approximate orientation of a marker could be determined when the markers were located within an area of 100 mm^3, up to 100 mm from the pick-up coil array. However, the deflection of the detected positions from the actual positions increased gradually as the distances of the markers from the pick-up coil array increased.

From the consideration of the mutual inductance between the exciting coil and the markers, the exact cause of the deflection was clarified, and the problem of the detectable space with high accuracy was solved. The impedance change of the exciting coil owing to the mutual inductance was found to perturb the excitation field. Although constant-current excitation is favorable for the system, this is an ideal case and, in practice, the compensatory tracking process is considered to be more effective. Using the proposed system, the positions of the markers can be distinguished to within less than 1 mm, and the absolute position accuracy for the marker is within 2 mm. Approximately correct orientations were obtained when the markers were located up to 140 mm from the pick-up coil array. These results indicate that the proposed system is capable of capturing the motion of markers wirelessly with high accuracy.

Acknowledgements

This study was supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through Grants-in-Aid for Scientific Research (B) Nos. 19300201 and 18360193, and by the Ministry of Health, Labour, and Welfare through a Grant-in-Aid for Scientific Research Project No. H18-Choujyu-Ippan-004.

References

[1] F. Grant, G. West, Interpretation Theory in Applied Geophysics, McGraw-Hill, New York, 1965, pp. 306–381.
[2] S.V. Marshall, IEEE Trans. Veh. Technol. VT-27 (1978) 65.
[3] W.M. Wynn, C.P. Frahm, P.J. Carroll, R.H. Clark, J. Wellhoner, M.J. Wynn, IEEE Trans. Magn. MAG-11 (1975) 701.
[4] F.H. Raab, E.B. Blood, T.O. Steiner, H.R. Jones, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. AES-15 (1979) 709.
[5] J.E. Mcfee, Y. Das, IEEE Trans. Antenn. Propag. AP-29 (1981) 282.
[6] J.A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, A. Adler, IBM Syst. J. 39 (2000) 892.
[7] S. Yabukami, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, K.I. Arai, K. Takahashi, A. Itagaki, N. Wako, IEEE Trans. Magn. 36 (2000) 3646.
[8] S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K.I. Arai, Y. Okazaki, J. Magn. Soc. Jpn. 28 (2004) 877.
[9] Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki, K.I. Arai, J. Magn. Soc. Jpn. 29 (2005) 153.
[10] S. Hashi, Y. Tokunaga, S. Yabukami, M. Toyoda, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K.I. Arai, IEEE Trans. Magn. 41 (2005) 4191.
[11] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K.I. Arai, IEEE Trans. Magn. 42 (2006) 3279.
[12] T. Nakagawa, Y. Koyanagi, Experimental Data Analysis by the Least Square Method, The University of Tokyo Press, Tokyo, 1982, pp. 95–99.

Biographies

Shuichiro Hashi received the DE degree in Electrical Engineering from Tohoku University, Japan, in 1998. He is an assistant professor in the Department of Materials Science and Technology, Gifu University. His research interests are in the area of applied magnetics, and magnetic materials.