

FIG. 2. Pictures of (a) developed motion capture system, (b) detecting part of the motion system, and (c) LC resonant magnetic marker with high permeability Ni-Zn ferrite core.

have the same frequency. To extract the marker contribution, the induced voltage is first measured without the marker and then measured with the marker. The marker voltage is then obtained by subtracting as vectors the induced voltage without the marker from the induced voltage with the marker.⁷⁻⁹ The position and orientation of the marker is calculated using the following equations [Eqs. (1), (2), and (3)], which effect an optimization using the Gauss-Newton method:¹⁰

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

$$\mathbf{B}_{\text{cal}}^{(i)}(\mathbf{p}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ -\frac{\mathbf{M}}{r_i^3} + \frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{r}_i}{r_i^5} \right\}, \quad (2)$$

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

Here $S(\mathbf{p})$ is an objective function (the least squares value), i is the coil number, n is the total number of coils, $\mathbf{B}_{\text{meas}}^{(i)}$ is the measured flux density, $\mathbf{B}_{\text{cal}}^{(i)}$ is the theoretical flux density that takes into account the magnetic dipole field, \mathbf{p} is the parameters of the marker, \mathbf{M} is the magnetic moment, (x, y, z) is the position of the marker, \mathbf{r} is the equation of an ideal dipole field expressed as a function of position and orientation, θ is

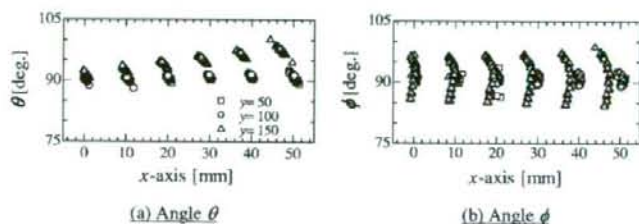


FIG. 4. Evaluation results for attitude angles (a) θ and (b) ϕ .

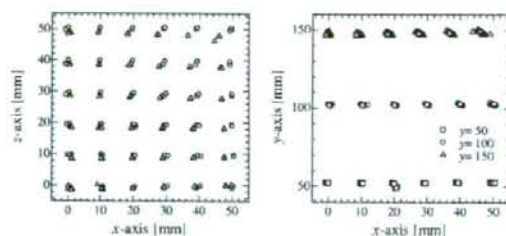


FIG. 3. Evaluation results for the developed motion capture system (xy-plane and xz-plane plot).

the angle between the x axis and the direction vector when the moment is projected on an xy plane, and ϕ is the angle between the direction of the moment and the z axis.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Figures 3(a) and 3(b) show the measured position of the marker orientated parallel to the y axis as it was swept in 10-mm steps along a grid pattern in the xz plane at $y=50$, 100, and 150 mm, measured by a precision three-dimensional-axial auto scanner [the marker was put on the end of a rod made of nonmagnetic resin, as shown in Fig. 2(b)]. Each point represents ten measurements at every marker position, with triangles for $y=50$ mm, circles for $y=100$ mm, and squares for $y=150$ mm. Good accuracy is seen in the position of the marker at $y=50$ mm and $y=100$ mm.

To capture the exact motion of the marker, the angle of the orientation of the marker must be measured. Figures 4(a) and 4(b) show the measured angles θ and ϕ , respectively. The figures show that approximately correct angles, $\theta = \phi = 90^\circ$, were acquired at $y=50$ mm and $y=100$ mm. However, at $y=150$ mm, a wide dispersion of θ and ϕ was measured, particularly when the marker was located far from the center of the system. This was due to the fact that the marker was not excited efficiently at these positions, degrading the SN ratio, because the deviation angle between the exciting field vector and the normal vector of the marker approached a right angle.

The relative error of the measured position of all the points at each y value was evaluated and expressed as an averaged value with a standard deviation. The results are as follows: 0.14 ± 0.60 mm at $y=50$ mm, 0.14 ± 0.19 mm at $y=100$ mm, and -0.60 ± 0.37 mm at $y=150$ mm. According to the results, the relative position accuracy was less than 1 mm.

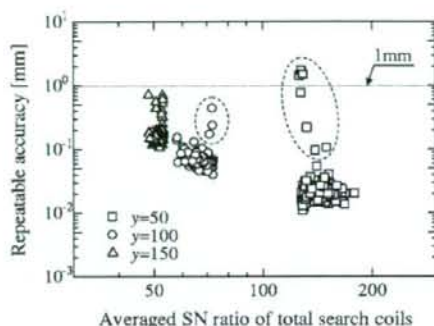


FIG. 5. The averaged SN ratio dependence of the repeatable position accuracy.

Figure 5 shows the relation between the averaged SN ratio of the total search coils and the repeatable position accuracy. The noise level of the system was estimated to be $3 \mu\text{V}$. It can be seen that the repeatable accuracy improved as the averaged SN ratio increased. However, several points of poor repeatable accuracy at a high SN ratio are seen at $y=50$ and 100 mm. It is thought that these points indicate the presence of coordinates with a local minimum due to the regular arrangement of the search coil array. It is believed that an asymmetrical arrangement of the search coils would eliminate such coordinates with local minima.

Overall, the results show that the system is capable of capturing the motion of the marker wirelessly with a high accuracy in the millimeter scale.

IV. CONCLUSION

The performance of a proposed magnetic motion capture system using an LC resonant magnetic marker was evalu-

ated. The relative position accuracy was found to be less than 1 mm and improved as the average SN ratio increased. The approximate orientation of the marker could be determined when the marker was located within the area of 100 mm^3 up to 150 mm from the pickup coil array, except in the region where the deviation angle between the direction of the exciting field at the marker and the normal vector of the marker was nearly equal to 90° .

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Industrial Technology Research Grant Program 03A47063a of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan. This study was also supported by Strategic Information and Communications R&D Promotion Programme (SCOPE) in the Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications (MPHPT).

¹F. Grant and G. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics* (McGraw-Hill, New York, 1965).

²S. V. Marshall, *IEEE Trans. Veh. Technol.* **VT-27**, 65 (1978).

³W. M. Wynn, C. P. Frahm, P. J. Carroll, R. H. Clark, J. Wellhoner, and M. J. Wynn, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-11**, 701 (1975).

⁴J. E. Mcfee and Y. Das, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-29**, 282 (1981).

⁵S. Yabukami, K. Arai, H. Kanetaka, S. Tsuji, and K. I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.* **28**, 711 (2004).

⁶J. A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, and A. Adler, *IBM Syst. J.* **39**, 892 (2000).

⁷S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K. I. Arai, and Y. Okazaki, *J. Magn. Soc. Jpn.* **28**, 877 (2004).

⁸S. Hashi, Y. Tokunaga, S. Yabukami, T. Kohno, T. Ozawa, Y. Okazaki, and K. I. Arai, *J. Magn. Mater.* **290-291**, 1330 (2005).

⁹Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki, and K. I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.* **29**, 153 (2005).

¹⁰T. Nakagawa and Y. Koyanagi, *Experimental Data Analysis by the Least Square Method* (The University of Tokyo Press, Tokyo, 1982).

Development of Wireless Magnetic Multi-position Detecting System Using FFT Analysis

M. Toyoda, S. Hashi, S. Yabukami*, M. Ohya, K. Ishiyama*, Y. Okazaki, K. I. Arai*

Faculty of Engineering Gifu University, 1-1 Yanai-cho, Gifu 501-1193, Japan

*Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

A wireless multi-position detecting system using three LC resonant magnetic markers was developed and demonstrated. The markers were given individual resonant frequencies of 183 kHz, 487 kHz, and 730 kHz, respectively. The new measuring technique described in this paper was applied to the system in order to reduce the acquisition time: the markers were excited by a superposed wave corresponding to the resonant frequencies, while the voltage signals induced through the pickup coils are separated into each frequency spectrum by FFT analysis. Regardless of the number of markers, the necessary voltage amplitude of each frequency spectrum can be obtained easily at the same time. Thus, our proposed system can detect multiple markers at a time. All the positional accuracies of the three markers are less than 5 mm within 100 mm of the pickup coil array.

Key words: multi-position detecting, LC resonant magnetic marker, wireless sensing, FFT analysis

複数 LC 共振型磁気マーカーを用いた多点位置検出システム

豊田 征治, 栢 修一郎, 藪 上 信*, 大矢 雅志, 石山 和志*, 岡崎 靖雄, 荒井 賢一*

岐阜大学工学部, 岐阜市柳戸 1-1 (〒501-1193)

*東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

1. はじめに

これまでにモーションキャプチャに代表される 3 次元空間内における物体の位置や方向を計測する手法については、様々な方式が考案され実用化されている^{1) - 6)}。しかしながら検出対象物が光学的に遮蔽された空間に存在し、貼付するマーカーへの配線が困難または望ましくないような状況下で高精度な計測を行う方式はほとんど見あたらない。そこで著者は、このような状況に対応可能な、LC 共振型ワイヤレス磁気マーカー (以下、LC マーカーと呼ぶ) を用いた位置・方向検出手法を提案し検討を行っている。この方式で用いるマーカーは配線およびバッテリーの搭載が不要なため小型化が可能であり、また LC マーカーに異なる共振周波数を個別に設定することで多点計測が可能となるため、例えば、指先など生体の複雑な動きを正確に捉える用途に適している。具体的な応用例として仮想空間内における入力デバイスが挙げられる。これは、指先に添付したマーカーの位置を検出し各指先の動きをトレースすることで、仮想的なキーボード操作を可能にするものである。この例では、指の動きによってマーカーがセンサの死角に入る場合が

考えられる。また指の自然な動作を妨げないように、マーカーは小型・軽量で駆動のための配線が無いことが望ましいと言える。Table 1 は本論文で試作したシステムと他のシステムとの仕様を比較できるようにまとめたものである。本システムに比べて他のシステムでは以下のような問題点が挙げられる。同じ交流磁気式ではマーカーに配線が必要であること、永久磁石を用いた直流磁気式ではマーカー数が 2 個までに限られ、また地磁気の影響を受け易いこと、光学式についてはマーカーがカメラの死角に入った場合や背景に対してマーカーのコントラストが十分得られない場合には検出不可能になること、多点計測の際に全てのマーカーの動きを視認できる位置にビデオカメラを配置する必要があるため設置位置の自由度が少ないことが挙げられる。しかし、LC マーカーを用いたシステムではこれらの問題を解決可能であると考えられる。我々はこれまでに、この手法を用いたシステムを試作し、100 mm 立方の空間内に配置した 1 個の LC マーカーの位置および方向を、計測速度 1 Hz 程度、相対位置精度 2 mm 以下で検出可能であることを示してきた^{6) - 8)}。

Table 1 Specification comparison of proposed system with other system.

	This paper	AC magnetic	DC magnetic ¹⁾	Optical
System	LC resonant magnetic marker / Pickup coil	AC magnetic field source 3-axial magnetic sensor	Permanent magnet Hole sensor	Luminescent, Color contrast Video camera
Wired/Wireless	Wireless	Wired	Wireless	Wireless
Detectable range	50-100 mm	≤ 760 mm	≤ 50 mm	≤ 30 m
Position accuracy	5 mm cubic	0.76 mm cubic	0.3 mm cubic	range / 1,000
Detection speed	1 Hz (3 Hz) ¹⁾	120 Hz	100 Hz	60 Hz
Number of markers	≥ 3 ²⁾	≤ 16	≤ 2	≤ 64

¹⁾ Under a sufficient number of instruments and CPUs, ²⁾ Under consideration.

今回、著者らはこのシステムを更に発展させ、複数の LC マーカの位置および方向を同時に検出するシステムを試作し、多点計測に関する基礎検討を行った。本論文に示すシステムの特徴は、個々の LC マーカに異なる共振周波数を設定することによって各マーカを同時かつ個別に検出できる点である。このために、LC マーカに印加する励磁磁界に複数の周波数成分を重畳した重畳励磁波を用いた。また、磁界検出コイルの誘起電圧の測定には高速サンプリングが可能なデジタイザを用いて誘起電圧波形を取得し、得られた波形データを FFT 解析することにより個別の周波数成分に分離して電圧振幅を得る方式を採用するなど、計測系の見直しを行った。更に、過去に報告されている永久磁石をマーカに用いた直流磁気式⁹⁾に対する優位性を示すため、3 個の LC マーカを用いた同時検出についての検討を行った。その結果、Table 1 に示すように、検出コイルアレイから 50~100 mm の範囲を 5 mm 立方以内のばらつきで 3 個のマーカを同時検出可能であることが明らかとなった。以下にその詳細を報告する。

2. システムの構成と位置検出原理

2.1 システムの構成

構築したシステムの模式図を Fig. 1 に示す。直径 210 mm のテフロン製ボビンに巻かれた励磁コイル（線径 0.26 mm×10 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×50 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 150 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イザに接続されている。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。今回使用したデジタイザは 2 系統の入力端子を有しているため、スイッチモジュールを 2 台用いて、それぞれに 13 個と 12 個の検出コイルを割り当て、同時に 2 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。

外部磁界による駆動が可能な LC 共振型磁気マーカを Fig. 2 に示す。直径 3 mm、長さ 10 mm のフェライト磁心 (TDK 製 PC40, Mn-Zn フェライト, $\mu = 2,300$, $B_s = 0.51$ T) に施した 335 回の巻線の両端にチップコンデンサが接続されている。これよりマーカ自身が LC 共振回路を構成している。また今回作製した LC マーカ 3 個の仕様を Table 2 に示す。各マーカはコイル巻数とコンデンサ容量によって共振周波数を変化させているが、サイズは全て Fig. 2 に示すように、直径 4 mm、長さ 10 mm、重さは 0.64g 程度である。また LC マーカは、Fig. 1 に示すような座標系を設定し、非磁性、非金属の台座によって検出空間内に、1 mm 程度の設置精度で配置した。

2.2 誘起電圧計測方法

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 マーカから発生され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 マーカの発する誘導磁界は同じ周波数成分を持つため、直接測

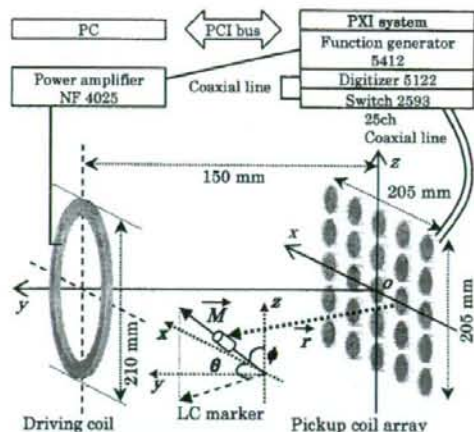


Fig. 1 Schematic diagram of the system.

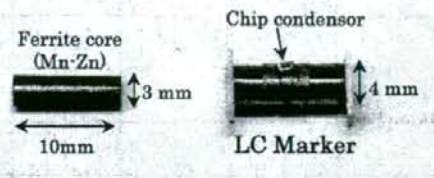


Fig. 2 Shape of the LC resonant magnetic marker.

定することは困難である。しかし、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 Fig. 3 (a) に示す。また両者の差分をとった結果を Fig. 3 (b) に示す。これらが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。このピーク-ピーク電圧が LC マーカの発する磁界強度に比例することから、本論文ではマーカ電圧 V_{MK} と定義し、検出コイル毎の V_{MK} を用いて、2.3 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。しかし、Fig. 3 (b) に示すようにマーカ 1 個につき 2 点の周波数 (f_1, f_2) の電圧計測を行う必要があり、電圧計測器として DMM (Digital Multi-Meter) を用いた以前のシステムでは⁷⁾、マーカ個数の増加に伴って測定周波数を切り替える回数が増加し、計測速度の低下が懸念される。Fig. 4 は、3 個の LC マーカの V_{MK} を測定する場合の周波数特性の概略図である。3 個の場合、各 LC マーカの共振周波数前後の $f_1 \sim f_6$ についての電圧を計測し 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イザ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。Fig. 3 (a) にその概念図を示す。また、FFT

Table 2 Specifications of LC markers.

	Marker 1	Marker 2	Marker 3
Resonant frequency (kHz)	183	487	730
f_1 (kHz)	182	481	720
f_2 (kHz)	185	492	740
Diameter of core (mm)	3	3	3
Coil turns	335	335	280
Condenser (pF)	680	68	33
Inductance (μ H)	1026	1598	1546
Quality factor	59	27	27

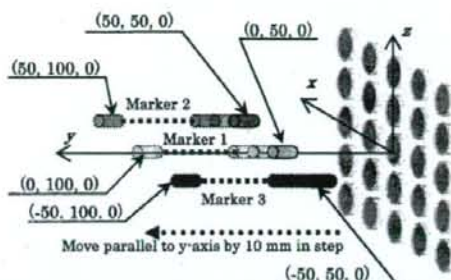
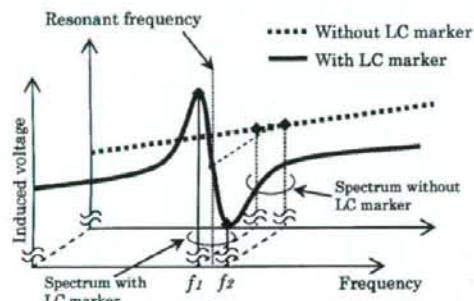
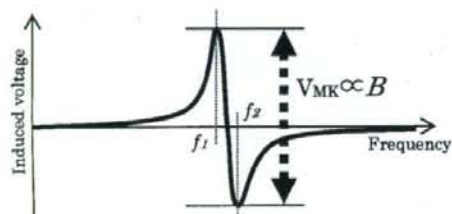


Fig. 5 Arrangement of the markers and pick-up coil array.



(a) Influence on the induced voltage of the LC marker, and amplitude spectrum after FFT



(b) Marker's contribution voltage

Fig. 3 Background and marker's contribution.

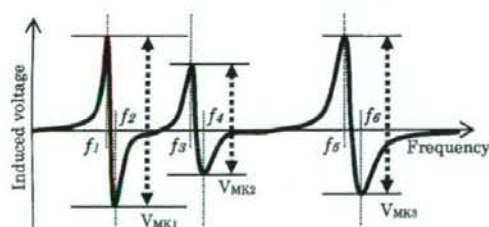


Fig. 4 Marker's contribution voltage when three markers are detected.

解析後のスペクトルの周波数分解能はデジタイザのサンプリング周波数とサンプリング数に依存するが、サンプリング数が増えるとFFT解析にかかる時間が増加する。一方、本論文のシステムではスイッチの切り替えおよびその安定までの待機時間が必要なため、FFTの計算にかかる時間はスイッチが安定するまで十分待機

できる時間と同程度になるよう検討した結果、サンプリング数を50,000個とした。これに対しFFT解析の周波数分解能が1kHzになるように、サンプリング周波数を50MHzとした。

2.3 位置算出原理

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)からマーカの位置および方向を算出し、Gauss-Newton法⁽¹⁾により最適化を行った。

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

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

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

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)、 $\vec{B}_{meas}^{(i)}$ は検出コイル*i*における磁束密度の測定値、 $\vec{B}_{cal}^{(i)}$ 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 xy 平面に射影したモーメントの方向ベクトルと x 軸とのなす角、 ϕ はモーメントの方向ベクトルと z 軸のなす角(Fig. 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。

3. 実験結果および考察

3個のLCマーカ(1~3)をFig. 5のように x 軸と平行な直線上に並べ、10mm刻みで $50 \leq y \leq 100$ の範囲の各位置において100回ずつマーカの位置・方向の検出を行った。各LCマーカはマーカの中心軸と励磁コイルおよび検出コイルの中心軸が平行($\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$)になるように設置した。なお、LCマーカの実際の設置座標は検出コイル側のマーカ端面の中心を基準とした。

Fig. 6は、検出の結果を(a) xy 平面、(b) yz 平面から見たものである。各検出位置におけるLCマーカの信号対雑音比(S/N比)を数値で示した。なお、このS/N比は各検出コイル25個のS/N比の二乗平均値で算出しており、本システムのノイズレベルは30 μ V程度であった。Fig. 6より、どの位置でも検出位置のばらつきはおよそ5mm立方以内となった。標準偏差で評価した検出位置のばらつきとS/N比の関係をFig. 7に示す。図から、S/N比が低

い位置ではばらつきが大きくなることが分かる。S/N 比が1桁台にもかかわらず検出位置のばらつきがこの程度に収まっているのは、マーカとの距離が比較的近い検出コイルのS/N 比は高いが、全体としてはS/N 比が低いものが多いためである。

また Fig. 6 (a)より、検出コイルからの距離が大きくなるにしたがって、マーカ2およびマーカ3の検出位置が徐々に中心へずんでいくことが分かる。実際のLCマーカの設置位置には1 mm程度の不確定さがあるが、このずれはそれを超えているため、S/N 比の低い検出コイルの配置に原因があるのではないかと考えた。

そこで、マーカ2を座標(50, 100, 0)に配置したときの実測データからS/N 比がそれぞれ3および5以下となる検出コイルの配置を調べ、各検出コイルのデータを式(2)より求められるダイポール磁界がつくる理論値に置き換えて位置算出を行い、実測値のみの場合と比較した結果をFig. 8に示す。これよりS/N 比の低い検出コイルのデータを理論値に置き換えることで、算出位置が実際のマ

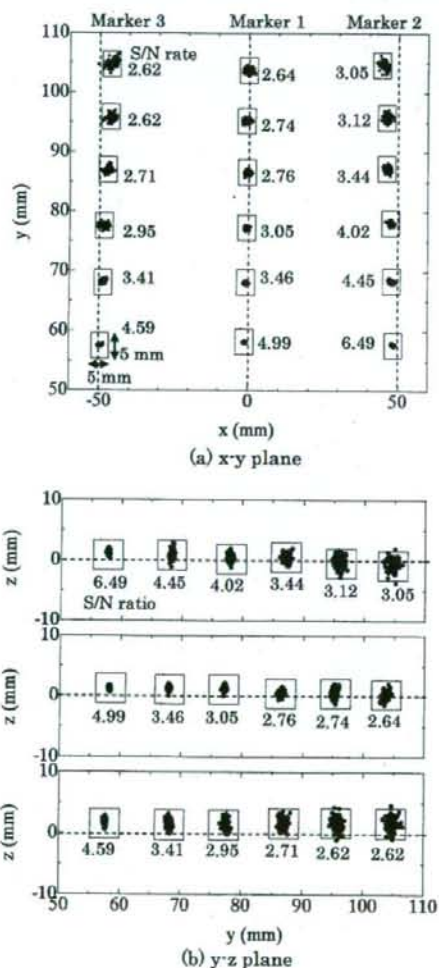


Fig. 6 Calculated position and S/N ratio of each position.

ーカ設置位置に近づくことが分かる。また Fig. 9に、マーカ2の設置位置がそれぞれ(a) (50, 50, 0), (b) (50, 100, 0)のときの各検出コイルのS/N 比の分布を示した。Fig. 9 (a)に示すように、マーカが検出コイルアレイに対して比較的近い位置にある場合はマーカに近い検出コイルのS/N 比が高いため、S/N 比の低い検出コイルの影響を受けにくい。Fig. 9 (b)ではS/N 比が最大のもでも30程度しかなく、更にS/N 比の低い検出コイルがマーカから見て右よりに偏っていることが分かる。以上のことから、S/N 比が全体的に低く、またS/N 比が5以下の検出コイルがアレイの片側に偏って存在するような場合にはマーカの検出位置への影響が大きくなるものと思われる。なお、Fig. 9に示すS/N 比について、検出コイルアレイに対するLCマーカの配置と姿勢角によって、マーカの発する磁界ベクトルの検出コイルへの鎖交状況は大きく変化するため、単純にマーカと検出コイルの距離に対応した値にはならず、ある一定の距離を境に検出コイル裏側から回りこんで鎖交する磁界ベクトルの影響も考慮する必要がある。

また、検出にかかった時間をFig. 10に示す。検出コイル25個

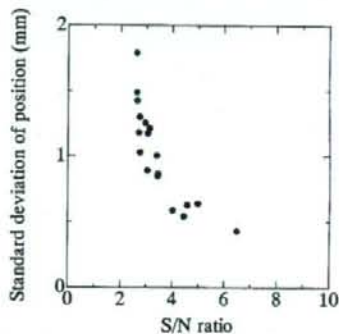


Fig. 7 Position unevenness as a function of the S/N ratio.

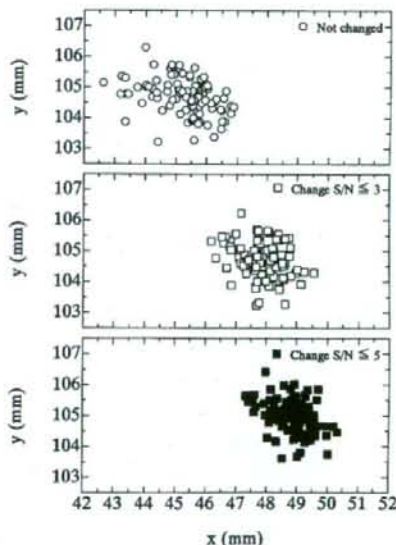


Fig. 8 Position calculated by changing VMKS which have low S/N ratios to theoretical values.

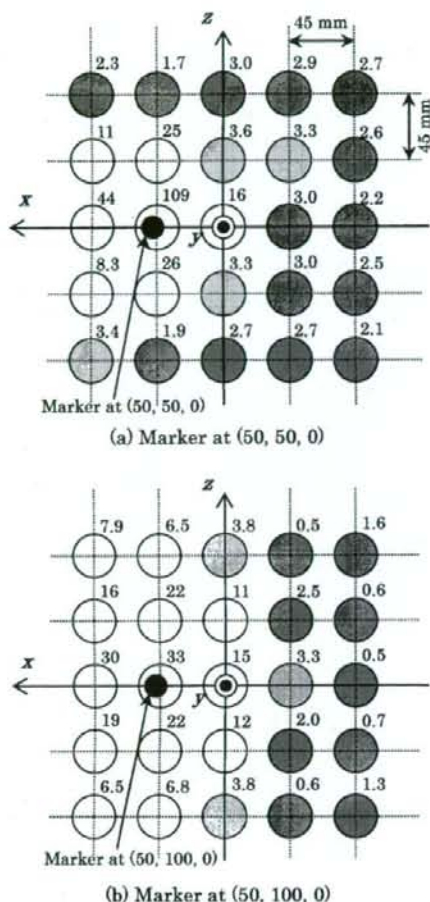


Fig. 9 S/N ratio of each pickup coil (S/N ratio of light grey coils ≤ 5 , dark grey coils ≤ 3).

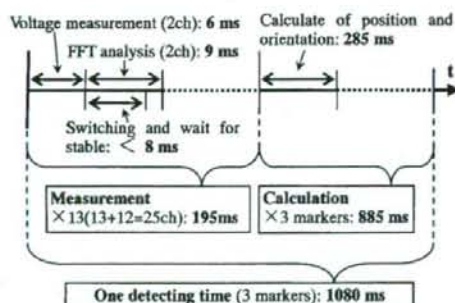


Fig. 10 An acquisition time chart for the motion of the marker.

分の電圧計測およびFFT変換に195 ms、位置算出に3個で885 ms (1個のマーカあたり295 ms)、1回の検出あたりで1080 ms、検出速度としておよそ1 Hzという結果を得た。ただし、計測器を各検出コイル分、また算出用CPUを各LCマーカ分用意すること

で、検出にかかる時間は1chの電圧測定にかかる15 msとマーカ1個にかかる295 msの和の310 msとなり、検出速度にして3 Hz程度が実現可能である。位置算出アルゴリズムの最適化によって更なる高速化が可能であると考えられる。また一度に検出可能なマーカの数については、現時点では詳細な検討を行っておらず今後の課題であるが、マーカ共振回路の性能指数や検出コイルの周波数特性について検討を行うことで更に増やすことが可能である。

4. まとめ

重畳励磁波とデジタル化を用いたFFT解析による複数のLCマーカの位置検出手法を提案し検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 3個のLCマーカの位置検出を行った結果、検出コイルアレイから50~100 mmの範囲で検出位置は5 mm立方程度のばらつきであった。
- (2) 3個のLCマーカの位置を検出するのに要する時間は1080 msで測定速度にするとおよそ1 Hzであった。その内訳は電圧計測に195 ms、3個のLCマーカの位置算出に885 msであった。
- (3) LCマーカをある特定の領域に配置したとき、S/N比が低い検出コイルが検出コイルアレイ中に偏って分布し、実際のマーカの位置よりも数mm程度ずれて検出されることがわかった。

謝辞 本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の「産業技術研究助成事業」(プロジェクトID:03A47063a)により行った。また本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開発制度」(5E5番126号)の助成により行った。

References

- 1) F. R. Raab, E. B. Blood, T. O. Steiner, and H. Jones, *IEEE Trans. Aero. Electro.*, AES-15, 709 (1979).
- 2) S. V. Marshall, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, VT-27, 65 (1978).
- 3) W. M. Wynn, C. P. Frahm, P. J. Carroll, R. H. Clark, J. Wellhoner, M. J. Wynn, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-11, 701 (1975).
- 4) J. E. Mcfee, Y. Das, *IEEE Trans. Antennas and propagation*, AP-29, 282 (1981).
- 5) N. M. Prakash and F. A. Spelman, *Proc. 19th Inter. Conf. IEEE/EMBS*, 2394 (1997).
- 6) S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K. I. Arai, and Y. Okazaki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 28, 877 (2004).
- 7) Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki and K. I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29, 153 (2005).
- 8) S. Hashi, Y. Tokunaga, S. Yabukami, T. Kohno, T. Ozawa, Y. Okazaki, K. Ishiyama and K. I. Arai, *J. Magn. Magn. Mater.*, 290-291, 1330 (2005).
- 9) S. Yabukami, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, K. I. Arai, A. Itagaki and N. Wako, *IEEE Trans. Magn.*, 36, 3646 (2000).
- 10) T. Nakagawa, Y. Koyanagi, *Experimental Data Analysis by the least square method*, (in Japanese) p. 95, (The University of Tokyo Press, Tokyo, 1982).
- 11) S. Yabukami, K. Arai, H. Knetaka, S. Tsuji, K. I. Arai, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 28, 711 (2004).

2005年10月19日受理、2006年2月21日採録

Wireless Magnetic Motion Capture System for Multi-Marker Detection

Shuichiro Hashi¹, Masaharu Toyoda¹, Shin Yabukami², Kazushi Ishiyama², Yasuo Okazaki¹, and Ken Ichi Arai²

¹Department of Materials Science and Technology, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

²Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Sendai 980-8577, Japan

A wireless multi-motion capture system using five LC resonant magnetic markers has been developed and is demonstrated. Each marker has an individual resonant frequency, 157, 201, 273, 323, and 440 kHz, respectively. A new measuring technique is applied in order to reduce the acquisition time. In this new technique the markers are excited by a superposed wave corresponding to the all 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. The positional accuracy for five markers is less than 2 mm within 100 mm of the pick-up coil array.

Index Terms—FFT analysis, LC resonant magnetic marker, multi-marker, wireless motion capture system.

I. INTRODUCTION

WIRELESS motion capture for multi-point detection at close range is a candidate technique for virtual input devices or medical treatment applications. In such applications, particularly for measurements of the motion of fingers, the markers used must be small and free from electric wiring to allow normal motion. In addition, the location and orientation of the markers must be known exactly during the measurement. Furthermore, if a dead angle is likely to occur, an optical method is unfavorable. There have been several investigations into determining the position of a magnetic object by measuring its magnetic field [1]–[6]. However, conventional systems require a comparatively large magnetic object as a marker or the marker must contain electric wiring, in order to obtain a high SN ratio for the magnetic signal from the marker. To address this, we have proposed and developed a wireless magnetic motion capture system using a magnetically-coupled LC resonant marker [7], [8]. The small sized marker uses a soft ferrite core with a coil, representing a minimal LC circuit with no battery, driven wirelessly by electromagnetic induction. The magnetic signal of the marker is detected by a matrix-designed pick-up coil array. Our proposed system allows the approximate orientation and the position of a single marker to be determined accurate to within 1 mm in a space 150 mm from the pick-up coil array. It also allows multi-point detection because the system allows the use of several markers with individual frequencies. In this paper, we extend our system to detect multiple markers and we examine the accuracy of the system in detecting the positions and orientations of the markers.

II. COMPONENTS AND MEASURING METHOD OF THE SYSTEM

Fig. 1 shows a schematic diagram of the motion capture system for multi-marker detection. The system is composed of measurement instruments and a coil assembly, consisting of a

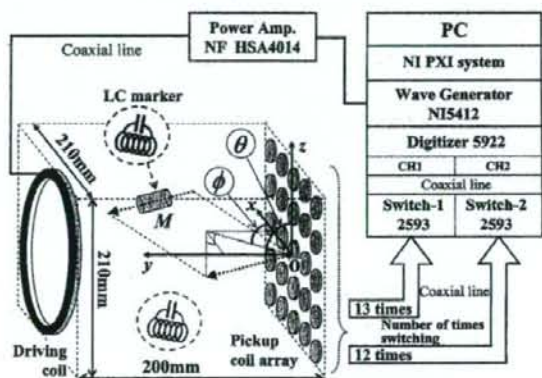


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed wireless motion capture system for multiple markers.

driving coil, LC markers, and a pick-up coil array. The marker consists of a Ni-Zn ferrite core (3 mm in diameter and 10-mm long) with a wound coil and a chip capacitor, representing an LC series circuit designed for resonant frequencies of 157, 201, 273, 323, and 440 kHz. The pick-up coil array consists of 25 coils placed at intervals of 45 mm on an acryl board, configuring a matrix layout. Each coil is made of 40 turns of polyester enameled copper wire (PEW) around an acryl bobbin 25 mm in diameter. An excitation of 22 V is applied to the driving coil (10 turns of PEW around the Teflon coil, 200 mm in diameter) and the markers are strongly excited at their resonant frequency by electromagnetic induction. However, the system becomes slow with an increase in the number of markers, owing to time required to switch frequencies and make multiple measurements. In this paper, a new signal measurement method is adopted to increase the system speed. All the markers are excited simultaneously by a superposed wave corresponding to all the resonant frequencies of the markers. As shown in Fig. 2, the induced wave measured by the pick-up coil is analyzed into a frequency spectrum by FFT analysis. First, the spectrum is measured without the markers and then the spectrum is

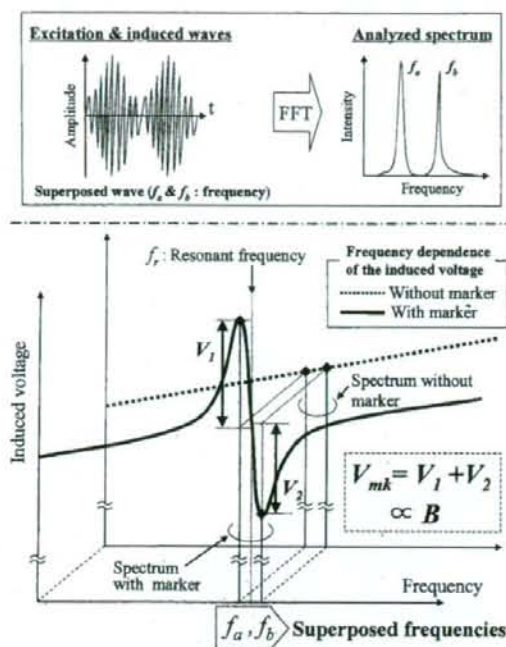


Fig. 2. Signal of LC marker acquisition technique (superposed wave excitation and FFT analysis).

measured with the markers. The induced voltages of the marker contributions, V_{mk} , can be obtained by subtracting as vectors the amplitude of the spectrum without the markers from the amplitude of the spectrum with the markers. The amplitudes V_{mk} measured by each pick-up coil are different from each other and proportional to the flux densities B that the markers produce at the location of the pick-up coils. The position and orientation of each marker is obtained by solving an inverse problem. However, several values (25 values in our study) of the flux density at a known location specify the magnetic flux source. To solve this problem, the generated flux density from a marker is considered to be a magnetic dipole field. Under this assumption, the position and orientation of a marker are calculated using the nonlinear method of least squares by the Gauss-Newton method [9]

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

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

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

Here $S(\vec{p})$ is an objective function (the least squares value), i is the coil number, n is the total number of coils, $\vec{B}_{\text{meas}}^{(i)}$ is the measured flux density, $\vec{B}_{\text{cal}}^{(i)}$ is the theoretical flux density that takes into account the magnetic dipole field, \vec{p} represents the parameters of the marker, \vec{M} is the magnetic moment, (x, y, z) is the

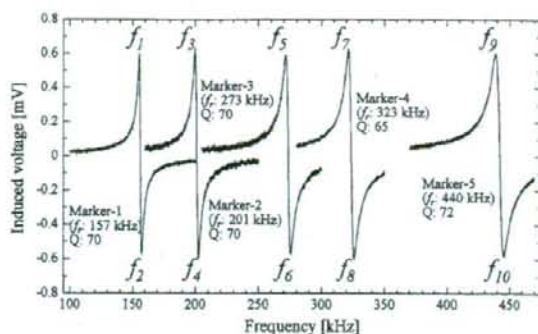


Fig. 3. Induced voltages due to excitation of five markers.

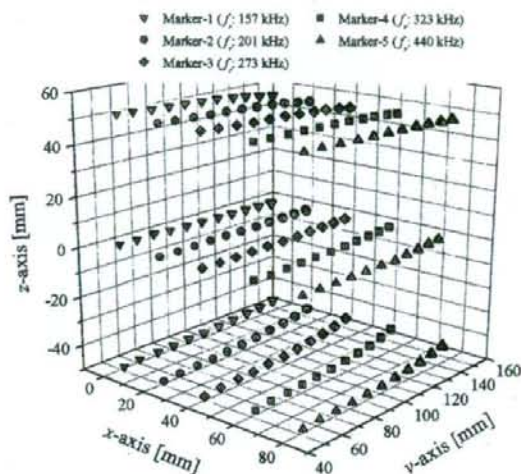


Fig. 4. Evaluation results of detected position (displayed in three dimensions).

position of the marker, and \vec{r} is an ideal dipole field expressed as a function of position and orientation. As shown in Fig. 1, ϕ is the angle between the x -axis and the direction vector when the moment is projected on an xy -plane and θ is the angle between the direction of the moment and the z -axis.

Fig. 3 shows the frequency dependence of the induced voltage from the markers. Sharp signals due to LC resonance of the markers were observed and there is no influence on neighboring signals from the skirts of the signals. In practice, the superposed wave, which is composed of ten frequencies corresponding to upper and lower peaks ($f_1 - f_{10}$), shown in Fig. 3 was used for excitation.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The position accuracy was verified experimentally for the system. Fig. 4 shows the detected positions and Fig. 5 shows the detected orientations when the five markers were lined up in five ranks parallel to the y -axis at 20-mm intervals. The markers were swept from $y = 50$ mm to 150 mm in 10-mm steps along the y -axis in the xy -plane at $z = 50$ mm, 0 mm, -50 mm (refer

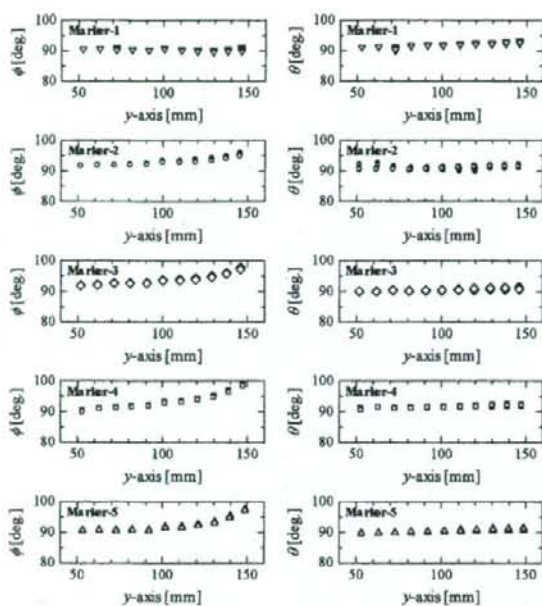


Fig. 5. Evaluation results for ϕ and θ (xy -plane at $z = 0$ mm).

to Fig. 1 for the coordinate system). As shown in Figs. 4 and 5, results can be distinguished to less than 1 mm and the position accuracy for each marker is within 2 mm. Approximately correct orientations were obtained when the markers were located up to 100 mm from the pick-up coil array. These results show that the system is capable of simultaneously capturing the motion of multi-markers wirelessly with a high accuracy. However, the detected positions were deflected toward the y -axis (the center axis of the pick-up coil array) gradually as the marker position increases over 100 mm from the pick-up coil array. Accordingly, the deviation of the attitude angle ϕ increases gradually up to about 10 degrees. A maximum positional deviation of around 6 mm was observed for markers located at (80, 150, 50), (80, 150, 0), and (80, 150, -50), whereas, as shown in Fig. 6, the intervals between adjacent markers were less than 3 mm in terms of relative position accuracy. The relative error of the measured position of all the points at intervals between adjacent markers was evaluated and expressed as an 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 relation between the size and arrangement of the driving coil and the pick-up coil array, though the exact cause of these defects is not yet clear.

IV. CONCLUSION

The performance of a proposed wireless magnetic motion capture system for multi-markers was evaluated for five LC res-

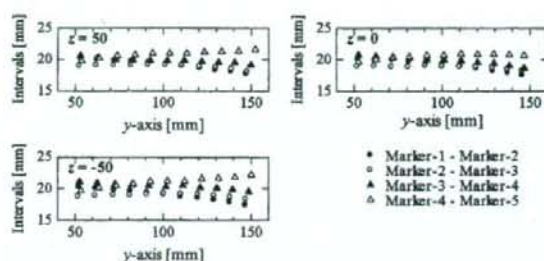


Fig. 6. Intervals between adjacent markers.

onant magnetic markers with individual resonant frequencies. The positional accuracy of the markers was found to be less than 2 mm and the approximate orientation of a marker could be determined when the marker was located within 100 mm³, up to 100 mm from the pick-up coil array. However, the detected positions were deflected toward the y -axis (the center axis of the pick-up coil array) gradually as the distance of the marker from the pick-up coil array increased.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Industrial Technology Research Grant Program in 03A47063a from the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan, and also in part by Strategic Information and Communication R&D Promotion Programme (SCOPE) in the Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications (MPHPT).

REFERENCES

- [1] F. Grant and G. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill, 1965, pp. 306–381.
- [2] S. V. Marshall, "Vehicle detection using a magnetic field sensor," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-27, pp. 65–68, 1978.
- [3] W. M. Wynn, C. P. Frahm, P. J. Carroll, R. H. Clark, J. Wellboner, and M. J. Wynn, "Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-11, pp. 701–707, 1975.
- [4] F. H. Raab, E. B. Blood, T. O. Steiner, and H. R. Jones, "Magnetic position and orientation tracking system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-15, pp. 709–718, 1979.
- [5] J. E. Mcfee and Y. Das, "Determination of the parameters of a dipole by measurement of its magnetic field," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-29, pp. 282–287, 1981.
- [6] J. A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, and A. Adler, *IBM Syst. J.*, vol. 39, no. 3 & 4, pp. 892–914, 2000.
- [7] S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K. I. Arai, and Y. Okazaki, "Development of a position-sensing system for a wireless magnetic marker," *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 28, pp. 877–885, 2004.
- [8] Y. Tokunaga, S. Hashi, S. Yabukami, T. Kohno, M. Toyoda, T. Ozawa, Y. Okazaki, and K. I. Arai, "Precision position-detecting system using an LC resonant magnetic marker," *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 29, pp. 153–156, 2005.
- [9] T. Nakagawa and Y. Koyanagi, *Experimental Data Analysis by the Least Square Method*. Tokyo, Japan: Univ. Tokyo Press, 1982, pp. 95–99.

Development of Magnetic Motion Capture System for Multi-Position Detection

Shuichiro Hashi^{1,*}, Masaharu Toyoda¹, Shin Yabukami², Masashi Ohya¹,
Kazushi Ishiyama³, Yasuo Okazaki¹, and Ken Ichi Arai⁴

¹Department of Materials Science and Technology, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

²Department of Electrical Engineering and Information Technology, Tohoku Gakuin University,
1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537, Japan

³Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

⁴The Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 2-1-1 Yagiyama-Minami, Taihaku-ku, Sendai 982-0807, Japan

(Received/Accepted: 2 July 2006)

We developed and demonstrated a wireless multi-position detecting system using up to five LC resonant magnetic markers. The small size and light weight marker (4 mm in diameter, 10 mm long and 0.63-g in weight) uses a soft ferrite core with a coil, representing a minimal LC circuit with no battery, driven wirelessly by electromagnetic induction. The markers were given respective resonant frequencies range of 150 kHz to 450 kHz. The magnetic signal of the marker is detected by twenty-five matrix-designed search coils array. Generated flux density from the marker is considered as an ideal magnetic dipole field, the position and orientation of the marker is calculated using the nonlinear method of least squares, which effect an optimization using the Gauss-Newton method. According to the attitude angle of the markers, positional and orientational accuracies of the markers degrade as the markers distance from the search coils array increase due to decrease of S/N ratio. Cylinder axes of the markers are arranged with exciting field, however, the positional error of the markers was less than 2 mm within 100 mm and the maximum error was less than 5 mm at 150 mm of the search coils array. Approximately correct orientation of the markers was able to be acquired.

Keywords: Wireless Motion Capture System, LC Resonant Magnetic Marker, Multi-Position Detection, Positional Orientational Accuracy.

1. INTRODUCTION

Motion capture in a close range is thought to be useful technique for a virtual input device of the next generation. For these applications, wearable small size marker of a wireless and a lightweight is strongly required not to prevent the action of arms or fingers. It is also necessary that the system can individually detect the invisible objects under optically shielded space. However, an optical method conventionally and widely used can not detect the marker in such cases. Magnetic motion capture systems are believed to satisfy these requirements. Several investigations to determine the position and orientation of the magnetic object or source have been reported.¹⁻⁷ However, conventional systems require a comparatively large sized magnetic object as a marker or the marker must

contain electric wiring, in order to obtain a high SN ratio for the magnetic signal from the marker. Therefore, we have developed a wireless multi-marker detecting system using LC resonant magnetic markers.⁸⁻¹⁰ In this paper, we have evaluated positional and orientational accuracy of the system in attitude angle of the markers.

2. SYSTEM COMPONENT AND SIGNAL ACQUISITION

Figure 1 shows a photograph and schematic illustration of a LC resonant magnetic marker. The marker consists of a Ni-Zn ferrite core (3-mm in diameter and 10-mm long) with wound coil and a chip capacitor, representing an LC series circuit.

Five markers, designed for resonant frequency of 157, 201, 273, 323, and 440 kHz, respectively, were prepared. Schematic diagram of a developed motion capture system

*Corresponding author; E-mail: hashi@cc.gifu-u.ac.jp

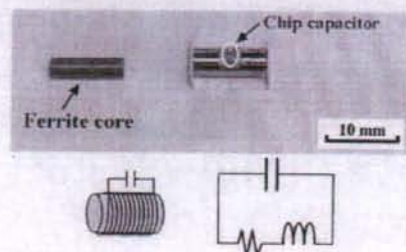


Fig. 1. Photograph and schematic illustration of a LC resonant magnetic marker.

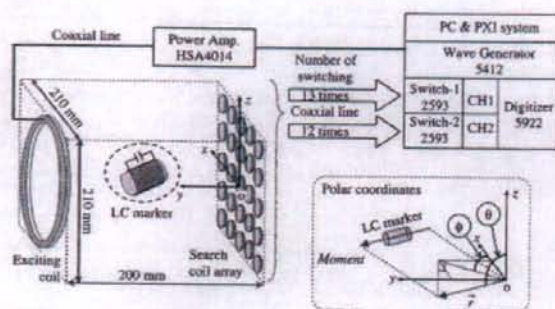


Fig. 2. Schematic diagram and coordinates for proposed motion capture system.

is shown in Figure 2. The system is composed of measurement equipments and a coil assembly consisting of an exciting coil and a matrix designed search coil array. The search coil array consists of twenty-five search coils placed at intervals of 45 mm on an acrylic board. The each coil is made of 40 turns of PEW (polyester enameled copper wire) around an acrylic bobbin 25-mm in diameter. The excitation voltage of 22 V is applied to the driving coil (10 turns of PEW around the Teflon coil 200-mm in diameter) and the markers are strongly excited at its resonant frequency by electromagnetic induction.

A superposed wave including all the resonant frequency components of the markers is used to realize simultaneous excitation. An induced voltage wave measured by the

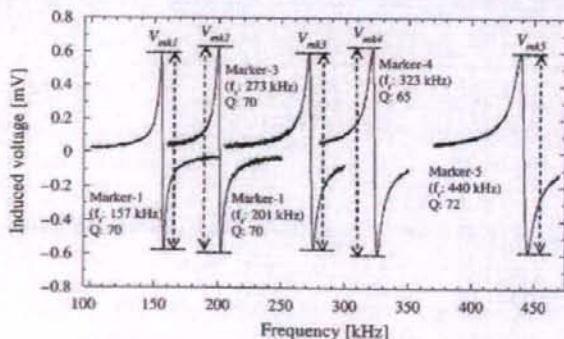


Fig. 3. Induced voltages V_{mk} due to excitation of five markers.

search coils is analyzed into each frequency spectra by FFT analysis. First, the spectra are measured without the marker then the spectra are measured with the marker. The induced voltage of the marker contributes V_{mk} can be obtained by subtracting as vectors the amplitude of spectrum without the marker from the amplitude of spectrum with the marker. Figure 3 shows frequency dependence of induced voltage from the markers. Sharp signals due to LC resonance of the markers were observed and there were no influence on neighbor signals from the skirts of each signal. The amplitudes V_{mk} measured by the each search coil are different from each other and proportional to the flux densities B which the marker produces for the location of the search coils.

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, using twenty-five values) of the flux density at known location 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, generated flux density from the marker is considered as a magnetic dipole field. 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.¹¹

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

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

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

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

4. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Figure 4, positional and orientational accuracies were evaluated at both attitude angle $\phi = 90^\circ$ (parallel

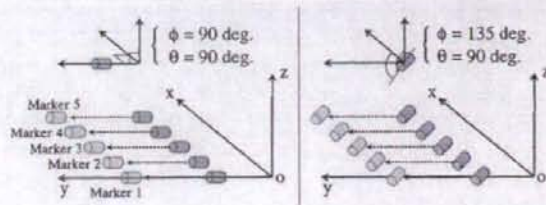


Fig. 4. Arrangement of the LC markers for evaluation of the system.

to the y -axis) and $\phi = 135^\circ$ when the five markers were lined up in five ranks at 20 mm intervals. The markers were swept from $y = 50$ mm to 150 mm every 10 mm step along the y -axis in xy -plane at $z = 0$ mm. Figure 5 shows the detected (a) positions and (b) orientation, each point represents 100 times measurements at every marker position. The detected results are represented by filled circle as $\phi = 90^\circ$ and open triangle as $\phi = 135^\circ$. As shown in Figure 5, uniqueness of solution less than 1 mm is obtained and the position accuracies for each marker were within 2 mm and approximately correct orientations were acquired at $\phi = 90^\circ$ when the markers were located up to 100 mm from the search coil array. Contrary to this, at $\phi = 135^\circ$, repeatable position and orientation accuracies become worse up to 5 mm and 5 degree, respectively. Furthermore, the position and the orientation in detected values scatter in all directions for around 10 to 15 mm as the markers position is left more than 100 mm from the search coils array. This is due to the fact that the marker is not excited efficiently at these positions, degrading the

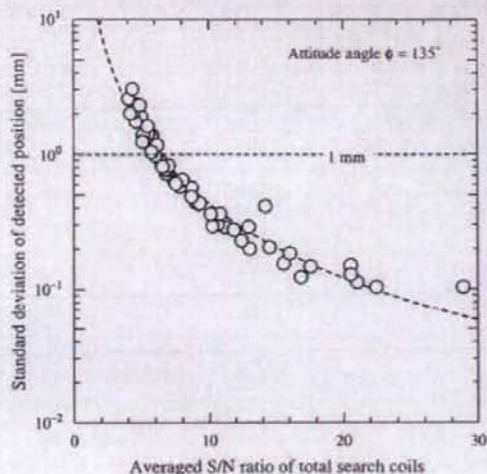


Fig. 6. Positional unevenness as a function of the S/N ratio.

SN ratio, because the deviation angle between the exciting field vector and the normal vector of the marker approach a right angle. In the xy -planes at z is not equals zero, as the actual positions of the marker with $\phi = 135^\circ$ were leaving from the center of search coils array, scattering tendency of the detected positions, like the Figure 5, were observed.

Figure 6 shows the relation between the averaged SN ratio of the total search coils and the repeatable position accuracy at attitude angle $\phi = 135^\circ$ to indicate the amount of scatter in measured values. The noise level of the system

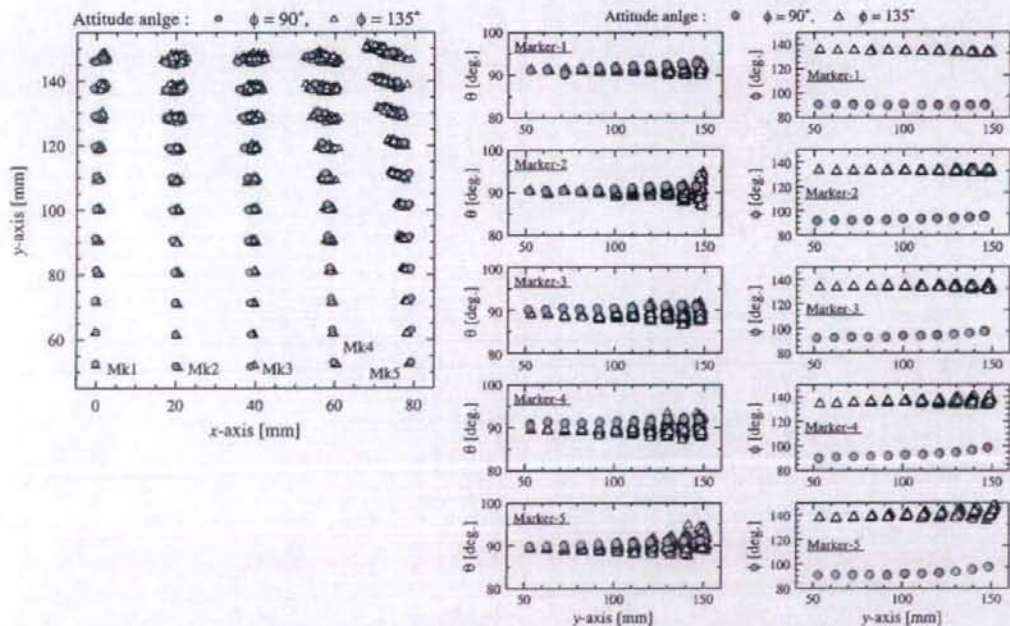


Fig. 5. Positional and attitude angle accuracies for different attitude of the marker.

was estimated to be $1 \mu\text{V}$. It can be seen that 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 with accuracy in the millimeter scale when cylinder axes of the markers are parallel with the exciting field.

However, accuracy in detection will become worse as the deviation between the attitude angles and the exciting field increase.

5. CONCLUSIONS

The performance of a proposed wireless magnetic motion capture system for five markers was evaluated. The LC resonant magnetic markers were given the individual resonant frequencies. According to the attitude angle of the markers, positional and orientational accuracies of the markers degrade as the markers distance from the search coils array increase due to decrease of S/N ratio. Cylinder axes of the markers are arranged with exciting field, however, the positional error of the markers was less than 2 mm within 100 mm and the maximum error was less than 5 mm at 150 mm of the search coils array. Approximately correct orientation of the markers was able to be acquired.

Acknowledgments: This study was supported in part by the Industrial Technology Research Grant Program in

03A47063a from the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan. This study was also supported in part by Strategic Information and Communication R&D Promotion Programme (SCOPE) in the Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications (MPHPT).

References and Notes

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

介護保険制度の課題と今後の展望

小坂 健

東北大学大学院歯学研究科 国際歯科保健学分野

I. 緒言

介護保険制度は2000年に導入されて以来、わが国の重要な社会保障制度の一つとなってきた。しかしながら、急激なサービス量の増加に伴い問題点も指摘されており、今後更に高齢化が進むことが予想されている中で(図1)、制度の持続可能性といった観点からの検討も必要ことから、介護保険法が改正され、2006年4月から施行となった。

新たな制度では、介護保険の基本的な理念である「自立支援」、すなわちその人の生活・人生を尊重し、出来る限り自立した生活を送ることを支援することを重点にして、その実現のため「介護予防サービス」の導入をすることとなった。このサービスにに歯科関係者の深く関わる「口腔機能の向上」のプログラムが加わることとなった。

II. 介護保険制度の現状と課題

介護サービスを利用する高齢者は約149万人(2000年4月)から329万人(2005年4月)へと2倍以上に増加している。それに伴い費用も3.6兆円(2000年度実績)から6.8兆円(2005年度実績)へ倍増している。今までの要支援や要介護度1、2の比較的軽度の要介護者においては、その多くが通所介護や訪問介護といった単一のサービスを受けている。しかし、要介護度の維持、改善という観点からすると、必ずしも効果的であったとはいえず、3割程度の要支援者及び要介護1の高齢者は重度化しているとする報告もある。必要のない電動車いすや電動ベッドなどの提供により、本人の身体活動がかえって低下してしまうこと等により、介護保険の本来の目的である高齢者の自立した生活を支援するということから離れてしまっている場合も

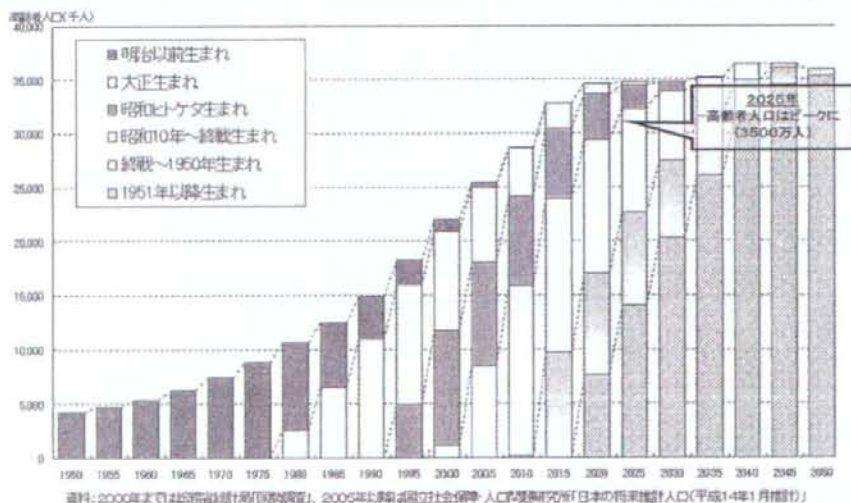


図1: 日本の将来の推計人口

我が国の高齢者人口は2025年にピークに達し、3,500万人になると予想されている。

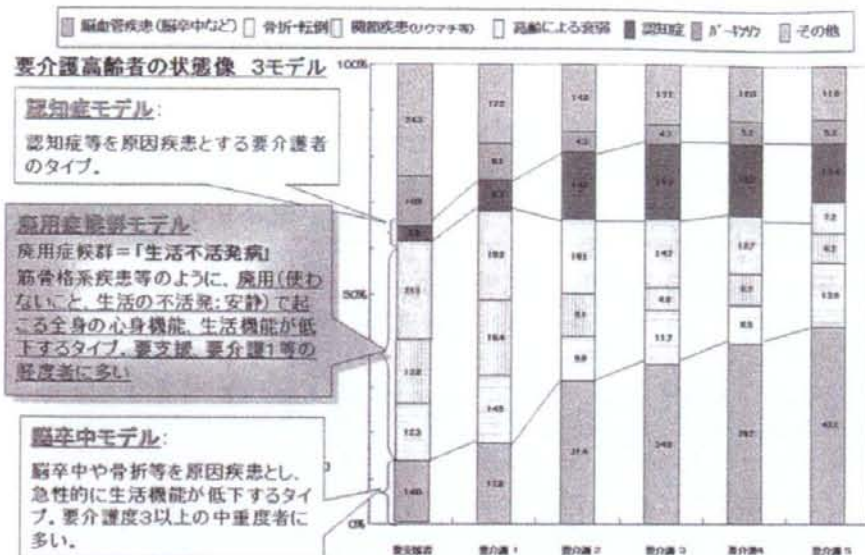


図2: 要介護に陥った原因疾患 (厚生労働省資料より)

要介護状態に陥った原因疾患は要支援といった軽度の要介護者については、廃用症候群に該当すると思われる疾患の割合が多い。

あるとの指摘もある。要介護になった原因についてみてみると、要介護4、5の高齢者が脳血管障害であるのに対して、軽度の要介護度の高齢者は、多くが使わないことによる骨関節の機能不全や筋力の低下によるいわゆる廃用症候群 disuse syndrome であることから、これらは適切なプログラムにより維持・改善が可能であると考えられている(図2)。

Ⅲ. 介護予防について

1. 介護予防の導入

介護予防とは、単に高齢者の運動機能や栄養状態といった個々の要素の改善だけを目指すものではない(表1)。世界保健機関WHOの生活機能分類 International Classification of Functioning, Disability and Health¹⁾の考え方を土台として、これら心身機能の改善や環境調整などを通じて、高齢者の生活行為(活動レベル)や参加(役割レベル)の向上をもたらし、1人ひとりの生き甲斐や自己実現のための取り組みを支援して、生活の質(QOL)の向上をめざすものである。これにより、国民の健康寿命を出来

る限り延伸するとともに、健全な長寿社会を創成することを目指している。

介護予防の具体的な取り組みとしては軽度の要介護者が主な対象となる介護保険サービスの一環としての「予防給付」と要介護認定では認定されるまでいかない地域の虚弱高齢者を対象として市町村が主体となって行われる「地域支援事業」の2つが大きな柱となる。

地域支援事業の対象者については、新たに整備された介護予防健診のチェックリスト等(表2)をもちいて地域の高齢者の中から特に虚弱な高齢者を把握し、プログラムに参加する対象を特定高齢者と呼ぶこととなった。また、これらの特定高齢者を対象としたプログラム等のハイリスク者への対応(ハイリスクアプローチ)以外に、広く地域の高齢者などに介護予防を働きかけるための方策(ポピュレーションアプローチ)も重要となる。

これらの新予防給付と地域支援事業については、市町村の「地域包括支援センター」においてケアマネジメントが行われることが大きな特徴である。これらのサービスの評価等にも市町

村が積極的に関わることにより、より効率的なサービスが行われることが期待される。

介護予防の導入にあたっては、これまでの国内外の文献の精査による既存の研究の検討や、長寿科学総合研究事業における研究結果や未来志向プロジェクトにおける先駆的な取り組み、さらには厚生労働省が行った介護予防市町村モデル事業などの結果を踏まえ検討されてきた。新たな要支援者を対象に行われる予防給付には、運動器の機能向上、栄養改善、口腔機能の向上が導入された。このほかに認知症、うつ、閉じこもりなどの対応についても、主として幅広い集団に対してサービスを実施することが有効と考えられることから、地域支援事業において実施することとなった。地域支援事業については、対象者の把握と選定が大切であり、これまで市町村などのプログラムに参加できなかったような、真にサービスが必要な高齢者をいかに把握し、実際のサービスにつなげるかということが重要である。対象者はこれまで通りの本人や家族からの①当事者ルート、②民生委員や老人クラブなどを通じた住民ルート、③商工会や農協や各種サークルなどを通じた民間ルート、④介護予防に関する検診な保健活動による行政ルート、⑤医療機関を通じたルートなどを

通じて様々なチャンネルを通じてハイリスクの高齢者を把握する必要がある。その上で市町村が主体となって創設される「地域包括支援センター」での適切なケアマネジメントに基づき、具体的なプログラムを本人の積極的な選択と同意の基に行うこととなった。

2. 介護予防の内容

1) 口腔機能の向上

高齢者にとって、おいしく、楽しく、安全な食生活は高齢者が健康で生き生きとした生活を送る上で欠かすことの出来ないものである²⁾。また、おいしく自分で食べられることは、脱水や低栄養の予防にもつながる。要介護度が重度化するにつれて嚥下性肺炎を起こす危険性が高くなると言われていることや、多くの高齢者においては肺炎まで至らなくても、知らないうちに誤嚥している(silent aspiration)が多くみられることがわかっている。このような中で、わが国で世界に先駆け口腔ケアが嚥下性肺炎の予防に対して重要な役割を担うことが証明されてきており³⁾、また、口腔ケアがインフルエンザ感染で感染する際のウイルスの開裂に必要なトリプシン様プロテアーゼを減少させ、防衛的に働く可能性があることも示唆されている⁴⁾。実際

表1：介護予防が目指すもの

介護予防が目指すものは、あくまで高齢者の自立支援、自己実現をお手伝いすることであり、様々な分野の取り組みによるまちづくりである。

介護予防が目指すもの

- 介護予防は目的ではなく手段
- 日常生活における「自己実現の達成」こそ真の目標
- 利用者の意欲を重視し自主的で継続的な取り組みへ
- 地域のネットワークが支援
(ヘルスプロモーション:まちづくり)

表2：基本チェックリスト

口腔機能に関係する13、14、15をすべて満たす高齢者を対象者の候補とする。

基本チェックリスト(案)

No.	質問項目	回答 (いずれかに○を お付け下さい)	
1	バスや電車で1人で外出していますか	0.はい	1.いいえ
2	日用品の買物をしていますか	0.はい	1.いいえ
3	預貯金の出し入れをしていますか	0.はい	1.いいえ
4	友人の家を訪ねていますか	0.はい	1.いいえ
5	家族や友人の相談にのっていますか	0.はい	1.いいえ
6	階段を手すりや壁をつたわずに昇っていますか	0.はい	1.いいえ
7	椅子に座った状態から何もつかまらずに立ち上がっていますか	0.はい	1.いいえ
8	15分位続けて歩いていますか	0.はい	1.いいえ
9	この1年間に転んだことがありますか	1.はい	0.いいえ
10	転倒に対する不安は大きいですか	1.はい	0.いいえ
11	6か月間で2~3kg以上の体重減少がありましたか	1.はい	0.いいえ
12	身長 cm 体重 kg (BMI)(注)		
13	半年前に比べて固いものが食べにくくなりましたか	1.はい	0.いいえ
14	お茶や汁物等でむせることがありますか	1.はい	0.いいえ
15	口の渇きが気になりますか	1.はい	0.いいえ
16	週に1回以上は外出していますか	0.はい	1.いいえ
17	昨年と比べて外出の回数が減っていますか	1.はい	0.いいえ
18	周りの人から「いつも同じ事を聞く」などの物忘れがあると云われますか	1.はい	0.いいえ
19	自分で電話番号を調べて、電話をかけることをしていますか	0.はい	1.いいえ
20	今日が何月何日かわからない時がありますか	1.はい	0.いいえ
21	(ここ2週間)毎日の生活に充実感がない	1.はい	0.いいえ
22	(ここ2週間)これまで楽しんでやれていたことが楽しめなくなった	1.はい	0.いいえ
23	(ここ2週間)以前は楽にできていたことが今ではおっくうに感じられる	1.はい	0.いいえ
24	(ここ2週間)自分が役に立つ人間だと思えない	1.はい	0.いいえ
25	(ここ2週間)わけもなく疲れたような感じがする	1.はい	0.いいえ

の介護予防プログラムにおいては、様々な原因疾患や高齢化により引き起こされる軽度の摂食・嚥下障害を有する高齢者に対して、口腔ケアや健口体操を始めとしたプログラムを行うこととなっている。摂食・嚥下訓練についての適応は、その時の状態だけでなく、脳血管障害によるものであれば、その障害部位、発病からの日数や年齢などによって影響を受けることから、これらの要因を総合的に判断し訓練の対象として適切かどうか判断される。介護予防により実際どのような高齢者を対象として行えば有効であるのかについてのデータなどについては今後、更なる研究が必要であると考えられる。また、これまで歯科関係者以外には広く認知されているとは言いがたかった口腔ケアの重要性について、介護予防への導入を機会として、様々な分野に波及していくことが考えられる。

2) 運動器の機能向上

高齢による衰弱あるいは転倒などの明確な疾病ではないが、加齢に伴う生活機能の低下については、身体や精神の活動低下が背景にあると考えられ、これまで不可逆的なものと考えられてきたが、ここ数十年余りの間に虚弱な高齢者においても運動器の機能向上がもたらされることが明らかになって以来、国内外の数多くの研究によって運動器の機能低下の改善や予防が可能であることが明らかになった⁵⁾。マシンを使ったトレーニング以外にも、弾力性のあるバンドをもちいたもの⁶⁾、ダンベルをもちいたもの、あるいは太極拳をふくめたバランストレーニングにより転倒予防や運動機能の改善に役立つことが分かってきている⁷⁾。高齢者の個々に応じたメニューにより、より適切なプログラムを行うことと、運動負荷を軽負荷のものから段階的に高めていくコンディショニング期間を設けるとともに、その後、筋力の向上をねらった筋力向上期間、さらに最終的に利用者のニーズを反映させた機能的トレーニング期間へと3ヶ月程度を1周期としている。

3) 低栄養対策

虚弱高齢者における低栄養を予防することの

重要性は次第に認識されるようになってきており、医療施設においてもNST(Nutrition Support Team)などの取り組みにより経口からの栄養摂取の重要性が認識されてきている。食事によって適正なタンパク質、エネルギーの摂取を行うことによって栄養状態が改善し、身体機能の改善が行われることは、メタアナリシス等の解析で示されている⁸⁾。介護保険を利用する高齢者においては、通所介護を利用している高齢者においては約1割で低栄養対策が必要とする報告もある。我が国では、これまでの栄養指導として生活習慣病の予防及び重症化予防を主な目的として、塩分制限や脂質の制限など食べる楽しみを制限する指導になりがちであった。介護予防の観点からは、食べる楽しみを重視し、食べることにより低栄養状態を予防・改善し、高齢者の生活機能を維持・向上させることが必要である。低栄養状態の改善のためには、単に食事を提供するのではなく、個別の計画に基づいた栄養素等の摂取と食事についての適切な相談が有効であることが明らかにされており、他職種協働による、双方向コミュニケーションを重視し行うことが適当である。

IV. おわりに

介護保険制度が改正され、介護予防のプログラムとして口腔ケアがプログラムに取り込まれたことは大変歓迎すべきことであるが、実際のプログラムの実施には主に現行の介護スタッフが主体となり、歯科医師等の歯科関係者の関わり方は必ずしも明確ではない。また、歯科治療を行っている場合には介護保険での介護予防としての報酬を算定できないなどの課題もある。チェックリストの項目を満たす高齢者の中には内服薬による口腔乾燥への対応や義歯の調整等によって解決されるものも含まれる可能性があり、今後これらを明らかにしていく必要がある。また、介護保険制度の中で歯科医師等の積極的な関与がこの制度の成否を決定していくとも考えられ、今後どのような関わり方が可能か提言していく必要がある。最後に、介護予防は単にプログラムをこなすことにあるのではなく、高齢者が家庭、地域あるいは様々な社会的なつな

がりの中で自分の役割を持って充実した生活を送ることを実現するため保健・福祉分野のみならず様々な分野での総合的な取り組みが必要であり、地域の文化や伝統等に即した総合的な介護予防の取り組みが期待されるのである。

V. 文献

- 1) World Health Organization. International Classification of Functioning, Disability and Health. <http://www3.who.int/icf/intros/ICF-Eng-Intro.pdf>
- 2) 加藤順吉郎. 福祉施設及び老人病院等における住民利用者(入所者・入院患者)の意識実態調査分析結果. 愛知医報 1434:2-14, 1998.
- 3) Yoneyama T, Yoshida M, Ohrai T et al. Oral care reduces pneumonia in older patients in nursing homes. *J Am Geriatr Soc.* 50:430-433, 2002.
- 4) Abe S, Ishihara K, Adachi M, Sasaki H, Tanaka K and Okuda K. Professional oral care reduces influenza infection in elderly. *Arch Gerontol Geriatr.* 2005 (in press)
- 5) Sevick MA, Bradham DD, Muender M, Chen GJ, Enarson C, Dailey M and Ettinger WH Jr. Cost-effectiveness of aerobic and resistance exercise in seniors with knee osteoarthritis. *Med Sci Sports Exerc.* 32:1534-1540, 2000.
- 6) Jette AM, Lachman M, Giorgetti MM et al. Exercise - it's never too late: the strong-for-life program. *Am J Public Health.* 89:66-72, 1999.
- 7) Gillespie LD, Gillespie WJ, Robertson MC, Lamb SE, Cumming RG and Rowe BH. Interventions for preventing falls in elderly people. *Cochrane Database Syst Rev.* 2003
- 8) Rebecca J Stratton, Ceri J Green, and Marinos Elia. *Disease-Related Malnutrition: An Evidence-Based Approach To Treatment.* CABI Publishing, Wallingford, United Kingdom. 2003.