

平成 22 年度
学士学位論文

相互相関法による音源位置推定

Estimation of sound source position by cross
correlation method

1110236 澳本 拓郎

指導教員 福本 昌弘

3 月 1 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

相互相関法による音源位置推定

澳本 拓郎

テレビ会議など，複数の音源が存在する空間において目的の音のみを受音する方法として，マイクロホンアレイの利用が挙げられる．マイクロホンアレイでは目的音源の正確な位置情報が必要となるため，音源の到来方向の推定や平面上における音源位置を推定する方法が提案されている．しかし，これらの方法では3次元空間における正確な音源位置を推定することができないという問題がある．

そこで，本論文では，音源の3次元位置情報を得ることを目的とし，4本のマイクロホンを用いた相互相関法の有効性を確認している．相互相関法では，相互相関によって求めた各マイクロホン間の音の到着時間差と各マイクロホンの位置情報を用いて連立方程式を立てることができ，この連立方程式を解くことによって音源の位置を推定している．実験によって音源の3次元位置を推定することが可能であることを確認したが，実際の音源位置との誤差が大きく，正確な音源位置を推定できていない場合があった．この推定誤差について検証，考察を行い，音の到着時間差の誤差が推定結果に大きな影響を及ぼしていることを確認している．また，計算機シミュレーションにより，マイクロホン間隔を広げることで，音の到着時間差の誤差による推定結果への影響を少なくできることを示している．

キーワード 相互相関，到着時間差，双曲線，マイクロホンアレイ

Abstract

Estimation of sound source position by cross correlation method

Takuro OKUMOTO

The microphone array is used as method to receive the purpose sound when multiple sound sources exist in space. The microphone array needs information of a sound source position. Until now, estimation methods for an arrival direction of sound source have been proposed as a means for estimate of a sound source position. Likewise, estimation methods for a two-dimensional(2D) sound source position have been proposed too. However, these methods can't estimate a sound source position exactly in three-dimensional(3D) space.

In this paper, the validity of the estimation method for a 3D sound source position using four microphones by the cross correlation method was confirmed. The cross correlation method is able to make simultaneous equations using a delay in arrival between microphones obtained by cross correlation. This method can estimate of a 3D sound source position by solving that simultaneous equations. The validity of the cross correlation method by a experiment was confirmed. However, result of estimation of a sound source position by a experiment had a measurement error. Therefore, a that measurement error was verified by a computer simulation, and so a cause of a that measurement error was a measurement error of a delay in arrival between microphones. The interval of microphones was verified by a computer simulation, and so a influence of a measurement error of a delay in arrival was lessened by enlarging the interval of

microphones.

key words cross-correlation, delay in arrival, hyperbola, microphone array

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	音源位置推定	3
2.1	はじめに	3
2.2	2 点間の到着時間差	3
2.3	相互相関	5
2.4	平面上での音源位置推定	7
2.4.1	音源位置の候補	7
2.4.2	3 本のマイクロホンを用いた推定方法	9
2.5	3 次元空間での音源位置推定	11
2.5.1	4 本のマイクロホンを用いた推定方法	12
2.6	音源位置推定の計算機シミュレーション	13
2.7	音源位置推定の実験	14
2.7.1	実験方法	14
2.7.2	実験結果	17
2.8	推定誤差についての検証	18
2.8.1	実験での推定誤差	19
2.8.2	到着時間差の誤差	20
2.8.3	到着時間差の誤差による推定結果への影響	21
	シミュレーション方法	21
	シミュレーション結果	22
	マイクロホン間隔による誤差の影響についての考察	25

目次

	サンプリング周波数の違いによる誤差の影響	26
	サンプリング周波数とマイクロホン間隔についての考察	27
第 3 章	結論	31
3.1	本研究のまとめ	31
3.2	今後の課題	32
	謝辞	33
	参考文献	34

目次

2.1	音の到着時間差	4
2.2	2本のマイクロホンで観測される信号	6
2.3	双曲線	8
2.4	2つのマイクロホンを焦点とした双曲線	9
2.5	双曲線同士の交点	11
2.6	実験でのマイクロホン配置 1	15
2.7	実験でのマイクロホン配置 2	15
2.8	実験での x 軸, y 軸	16
2.9	音源の x 軸を変化させながら推定	16
2.10	音源の y 軸を変化させながら推定	17
2.11	音源位置の x 軸を変化させた場合の推定誤差	19
2.12	音源位置の y 軸を変化させた場合の推定誤差	20
2.13	音源位置の x 軸を変化させた場合の時間差誤差	22
2.14	音源位置の y 軸を変化させた場合の時間差誤差	23
2.15	シミュレーション方法	23
2.16	シミュレーション結果	24
2.17	実験でのマイクロホン配置に対するシミュレーション結果	25
2.18	マイクロホン間隔が 8 サンプルの場合	26
2.19	マイクロホン間隔が 14 サンプルの場合	27
2.20	サンプリング周波数の違いによる誤差の影響	28
2.21	マイクロホン間隔が 8 サンプルの場合のすべての交点	29
2.22	マイクロホン間隔が 14 サンプルの場合のすべての交点	30

表目次

2.1	2本のマイクロホン, スピーカ座標	9
2.2	3本のマイクロホン, スピーカ座標	10
2.3	計算機シミュレーションでのマイクロホン, スピーカ座標	13
2.4	実験での4本のマイクロホン座標	17
2.5	音源位置の x 軸を変化させながら推定した結果	18
2.6	音源位置の y 軸を変化させながら推定した結果	18
2.7	音源位置の x 軸を変化させた場合の平均誤差と最大誤差	20
2.8	音源位置の y 軸を変化させた場合の平均誤差と最大誤差	21
2.9	計算機シミュレーションでの各マイクロホンの座標	27

第 1 章

序論

1.1 背景と目的

遠隔地同士の情報共有として、移動コストの削減や時間短縮に有効なテレビ会議の需要が高まっている。テレビ会議では、複数の遠隔地を結び、双方向の画像、音声によって会議を行う。そのため、発言者の音声情報を正確に遠隔地に送信する必要がある。しかし、テレビ会議では空間内に複数の人間が存在すると考えられるため、マイクロホンを用いて発言者の声を受音する場合、他者の声や物音などの雑音が取音され、正確な音声情報を遠隔地に送信できない可能性がある。このような状況で発言者の声を受音する方法として、複数のマイクロホンで構築されたマイクロホンアレイを用いる方法が考えられる。マイクロホンアレイを用いることによって指向性の制御が可能となり、発言者の方向へ鋭い指向性を形成することによって、周囲の雑音を抑圧することができる。しかし、発言者が移動したり発言者が交替するなど、音源の位置が変化する場合には、常にその変化に合わせて、マイクロホンアレイの指向性も変化させる必要がある。そのため、マイクロホンアレイによってテレビ会議等の受音を行う場合は、常に音源の位置情報が必要となる。これまでに音源の位置情報を推定する方法としてビームフォーミングを用いる方法 [1][2] が提案されている。しかし、ビームフォーミングを用いる方法では指向性マイクロホンを用いるため、指向性の方向調整が必要であるという問題がある。また、マイクロホン対によって音の到来方向を推定する方法 [3][4] が提案されている。これらの方法によって音源の存在する方向を推定できるが、到来方向のみの推定であるため、その方向に雑音が存在する場合、雑音に対しても指向性を向けることになる。音源の位置座標を推定する方法としては、2D MUSIC 法 [5] や、複数のマイ

1.2 本論文の構成

クロホンによって複数の音源到来方向を推定し、その交点を求める方法 [6] が提案されている。しかし、2D MUSIC 法は実環境において精度が著しく低下するという問題がある。また、これらの方法によって平面上での音源位置を推定することはできるが、3次元空間内における正確な音源位置に指向性を向けることはできない。マイクロホンアレイの指向性を3次元空間内の正確な音源位置に向けることができれば、受信信号の S/N 比をより向上させることができると考えられる。そこで本研究では、最もシンプルな構成である相互相関法によって、音源の3次元位置を推定できるか確認を行う。相互相関法では、音の到着時間差を用いて音源の位置を推定する。4本のマイクロホン間の到着時間差と各マイクロホンの位置座標から音源の3次元座標を演算によって推定することができる。算出した推定結果を用いることで、常にマイクロホンアレイの指向性を音源に対して正確に形成することが可能となる。

1.2 本論文の構成

本論文の構成について述べる。

第2章では音の到着時間差と音の到着時間差を求めるために用いる相互相関係数を紹介する。そして音の到着時間差を用いた音源位置の推定方法について述べる。また、実際に音源位置の推定を行い、得られた結果を示す。最後に、推定結果と実際の音源位置との誤差を示し、誤差についての検証、考察を行う。

第3章では以上によって得られた結果から本論文の結論を述べる。

第 2 章

音源位置推定

2.1 はじめに

人間や多くの生物は聞こえた音の到来方向や距離を推定することができる。この能力を音源定位といい、人間は両耳間到着時間差や両耳間音圧差，耳介によるスペクトルパターンの変化等を手掛かりとして，音源定位を行っている。この音源定位能力をマイクロホンを用いて実現するためには，複数のマイクロホンが必要となる。本研究で用いる相互相関法では，各マイクロホン間の音の到着時間差から音源の位置を推定する。

この章では，音源位置の推定に必要な音の到着時間差と，音の到着時間差を求める際に必要となる相互相関について述べ，マイク間の音の到着時間差を用いて音源位置の推定を行う方法について説明する。音源位置推定の方法は，まず，平面上での音源位置推定法についての説明を行い，その方法を 3 次元空間に拡張した方法について説明する。また，実際に 3 次元空間で音源の位置推定を行った結果を示す。最後に，実験での推定結果と実際の音源位置との誤差を示し，この誤差についての検証，考察を行う。

2.2 2 点間の到着時間差

音は 1 気圧の乾燥空気中を $331.5 + 0.61t$ (m/s) で移動する。ここで t は摂氏温度である。そのため，一定の間隔で並べた 2 本のマイクロホンを用いて音を受音した場合，図 2.1 に示すように，音源から各マイクロホンまでの距離の差によって，各マイクロホンに音が到着する時間に差が発生する。図 2.1 の場合，音源からマイクロホン M_2 までの距離を d_1 とする

2.2 2点間の到着時間差

と、音源からマイクロホン M_1 までの距離は $d_1 + d_2$ となり、 d_2 が音源から2本のマイクロホンまでの距離の差となる。この距離差 d_2 によって発生する音の到着時間差 n は音速を 340m/s とすると、

$$n(\text{s}) = \frac{d_2(\text{m})}{340(\text{m/s})} \quad (2.1)$$

となる。また、到着時間差 n が既知の場合、音源から各マイクロホンまでの距離差 d_2 を求めることができる。

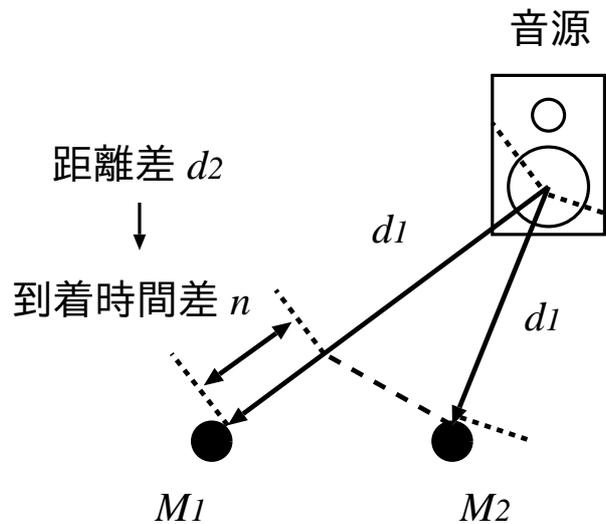


図 2.1 音の到着時間差

マイクロホンの位置が一定でも音源の位置によってマイクロホン間の音の到着時間差は異なり、2本のマイクロホンに対し正面から到来する音の場合、マイクロホン間の到着時間差は0となる。また2本のマイクロホンに対して真横から到来する音の場合、音源から各マイクロホンまでの距離の差がマイクロホン間の距離と等しくなり、マイクロホン間の到着時間差が最大となる。仮に、マイクロホン間の距離を 20cm 、音速を 340m/s とすると、

$$\frac{0.2(\text{m})}{340(\text{m/s})} = 0.00059(\text{s}) \quad (2.2)$$

最大で 0.59ms の遅延が発生する。また、録音のサンプリング周波数を 48kHz に設定した場合、

$$0.00059(\text{s}) \times 48000(\text{Hz}) = 28.32 \quad (2.3)$$

2.3 相互相関

最大の遅延サンプル数は約 28 となり，2本のマイクロホン間の距離が 20cm であれば，その遅延サンプル数の範囲は 0 から 28 サンプルの間となる．また，どちらのマイクロホンに最初に音が到着したかによって符号が異なり，どちらかのマイクロホンを基準に-28 から 28 サンプルの範囲で遅延が発生する．音源位置の推定は，音源から各マイクロホンまでの距離差を用いて行うため，マイクロホン間の遅延サンプル数を求める必要がある．

2.3 相互相関

マイクロホン間の音の到着時間差は，相互相関係数を用いることによって求めることができる．一定の間隔で並べた 2本のマイクロホンで受信した信号は，図 2.2 に示すように時間軸のずれを除けば類似した信号であるといえる．音源からの各マイクロホンまでの距離の差によって音の到着時間差が発生し，この音の到着時間差によって 2本のマイクロホンで観測される信号に位相差が発生する．この 2つの信号のずれを知りたい場合に利用される評価尺度が，相互相関係数とよばれる量である [7]．

評価したい 2つのデジタル信号を $f = \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$, $g = \{g_0, g_1, \dots, g_{N-1}\}$ とするとき，その相互相関係数 $\tilde{R}_n^{(fg)}$ は，

$$\tilde{R}_n^{(fg)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i g_{i+n}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (g_{i+n})^2}} \quad (2.4)$$

と定義される．この式は，信号 f の時間軸はそのままにして，信号 g のみを n サンプルだけずらして得られる信号，

$$g^{(n)} = \{g_{0+n}, g_{1+n}, \dots, g_{N-1+n}\} \quad (2.5)$$

との内積を計算している．内積は 2つの信号間の類似性を評価する尺度であるので，この類似性を時間ずれ n サンプルを変数にもつ係数として表している．なお，式 (2.5) においては通常，

$$g_i = g_{i+N} \quad (2.6)$$

2.3 相互相関

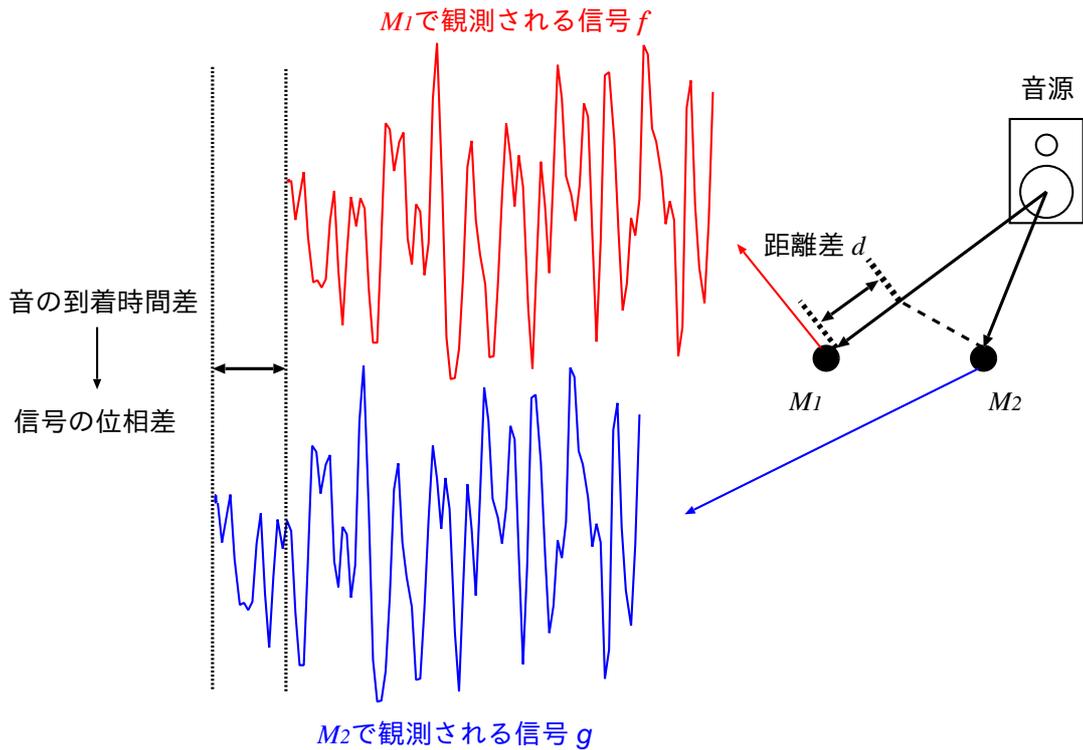


図 2.2 2本のマイクロホンで観測される信号

と N サンプルごとの周期性をもっていることを考慮すれば、式 (2.4) は次のように変形される。

$$\tilde{R}_n^{(fg)} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f_i g_{i+n}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} f_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} g_i^2}} \quad (2.7)$$

この式で得られる相互相関係数は、 -1 から $+1$ までの値をもち、正規化された相関値となる。また、あらかじめ信号の平均値を差し引くことで直流分を取り除くことができ、変化分に着目した相関を調べることが可能となる。このときの相互相関係数を $\hat{R}_n^{(fg)}$ と表せば、

$$\hat{R}_n^{(fg)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i \hat{g}_{i+n}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (\hat{g}_{i+n})^2}} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i \hat{g}_{i+n}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{g}_i^2}} \quad (2.8)$$

となる。この式で得られる相互相関係数の値が大きいほど、2つの信号の相関が強く、2つ

2.4 平面上での音源位置推定

の信号は類似した信号であるといえる。相関係数の絶対値が1に近くなるほど2つの信号は類似しており、相関係数の絶対値が1であった場合、2つの信号は同じ信号である。また、相関係数が0に近づくほど、2つの信号が類似していないことになる。

2つの信号の相互相関係数を求めたとき、その値が最も大きかった場合が2つの信号が最も類似しており、2つの信号に時間的なずれが無い場合である。つまり、相互相関係数の値が最も大きい場合のずらしたサンプル数 n が、2つの信号の時間軸のずれであるといえる。

このように、二つのマイクロホン間の音の到着時間差は、相互相関係数を用いて算出することが可能である。

2.4 平面上での音源位置推定

マイクロホンを用いて音源の位置を推定するためには、マイクロホン間の音の到着時間差を用いるため、複数のマイクロホンが必要となる。マイクロホンの本数が多いほど、より正確な音源位置を推定できる。この節では、3本のマイクロホンを用いて平面上の音源位置を推定する方法について説明する。

2.4.1 音源位置の候補

平面上において2本のマイクロホンで受信した信号から音源位置の候補を1本の双曲線として描くことができる。双曲線は図2.3のように、平面上において2定点 F_1 , F_2 からの距離の差が一定である点 P の軌跡である。点 F_1 , F_2 を双曲線の焦点といい、 $c > 0$ のとき、焦点座標を $F_1 = (c, 0)$, $F_2 = (-c, 0)$, 点 P を $P = (x, y)$ と置くと、 F_1 と P 間の距離 F_1P は

$$F_1P = \sqrt{|x - c|^2 + |y|^2} \quad (2.9)$$

となる。同様に F_2P は、

$$F_2P = \sqrt{|x - (-c)|^2 + |y|^2} \quad (2.10)$$

2.4 平面上での音源位置推定

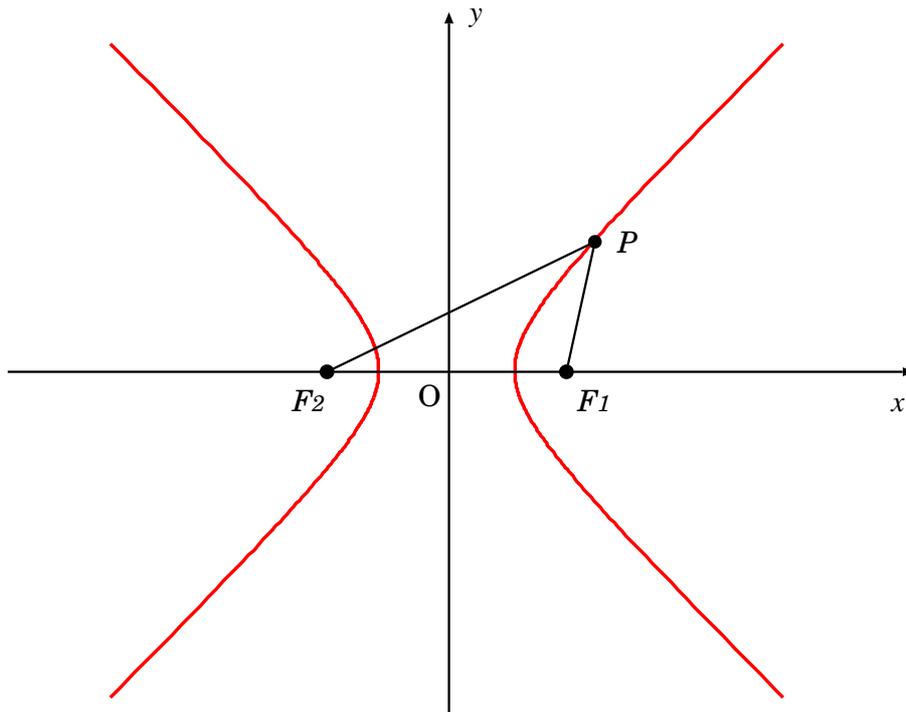


図 2.3 双曲線

となる。また a を定数として、

$$|F_1P - F_2P| = 2a \quad (c > a) \quad (2.11)$$

となる。 $2a$ は双曲線の x 軸との交点の距離の差、つまり双曲線上のある点から F_1 , F_2 までの距離の差である。

一定の間隔で並べた 2 本のマイクロホン間の音の到着時間差から、音源から各マイクロホンまでの距離の差を求めることができる。このマイクロホン間の距離差から 2 本のマイクロホンを焦点とした双曲線を描くことができ、音源はこの双曲線上に存在すると仮定できる。また、どちらのマイクロホンに最初に音が到着したか、到着時間差から判断することができるため、音源の位置をどちらか一方の曲線上に限定できる。

実際にマイクロホンを 2 本並べ、スピーカからの音を録音した。その 2 つの信号から相互相関を用いて到着時間差を求め、双曲線を描いた。このときのマイクロホンとスピーカの座標を表 2.1 に示す。また、このときのマイクロホン間の音の到着時間差をもとに描いた双曲線を図 2.4 に示す。この結果から、2 本のマイクロホン間の音の到着時間差をもとに音源位

2.4 平面上での音源位置推定

置を含む双曲線を描くことが可能であると確認できる。

表 2.1 2本のマイクロホン, スピーカ座標

	マイクロホン座標 (m)		スピーカ座標 (m)
	M_1	M_2	S
x	0.25	-0.25	-0.23
y	0.00	0.00	0.50

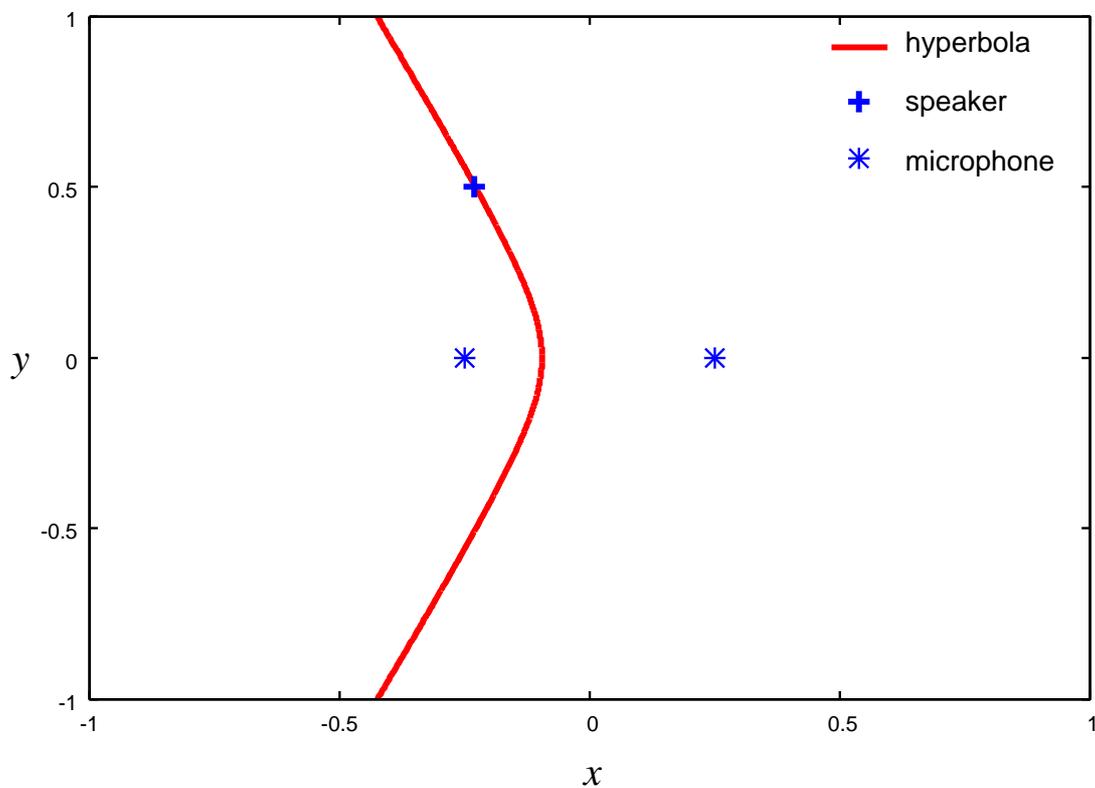


図 2.4 2つのマイクロホンを焦点とした双曲線

2.4.2 3本のマイクロホンを用いた推定方法

2本のマイクロホン間の到着時間差から、音源の位置を1本の双曲線上に限定できることを確認した。ここで、3本のマイクロホンを用いることにより、各マイクロホン間の到着時

2.4 平面上での音源位置推定

間差を求めることができるため、音源の位置を含む双曲線を複数描くことができる。音源は双曲線上に存在するため、双曲線同士の交点が音源の位置となる。

実際にマイクロホンを用いて、スピーカからの音を録音した。その3つの信号から相互相関を用いて音の到着時間差を2つ求め、双曲線を2本描いた。このときのマイクロホンとスピーカの座標を表 2.2 に示す。また、音の到着時間差をもとに描いた2本の双曲線を図 2.5 に示す。この結果より、音源の位置が双曲線同士の交点と重なっていることが確認できる。

表 2.2 3本のマイクロホン, スピーカ座標

	マイクロホン座標 (m)			スピーカ座標 (m)
	M_1	M_2	M_3	S
x	0.50	-0.50	0.0	-0.23
y	0.00	0.00	0.50	0.50

音源位置 S を $S = (Sx, Sy)$, 各マイクロホンの位置 M_1, M_2, M_3 をそれぞれ $M_1 = (Mx_1, My_1)$, $M_2 = (Mx_2, My_2)$, $M_3 = (Mx_3, My_3)$, マイクロホンに音が到達した時刻を t_1, t_2, t_3 とすると、マイクロホン M_1, M_2 間の音の到着時間差は $(t_2 - t_1)$ となり、式 (2.11) から

$$\sqrt{(Mx_2 - Sx)^2 + (My_2 - Sy)^2} - \sqrt{(Mx_1 - Sx)^2 + (My_1 - Sy)^2} = c(t_2 - t_1) \quad (2.12)$$

が成り立つ。ここで c は音速を表している。この (2.12) 式は、マイクロホン M_1, M_2 を焦点とした双曲線上にある点を表している。同様に、マイクロホン M_1, M_3 間の音の到着時間差は $(t_3 - t_1)$ となり、

$$\sqrt{(Mx_3 - Sx)^2 + (My_3 - Sy)^2} - \sqrt{(Mx_1 - Sx)^2 + (My_1 - Sy)^2} = c(t_3 - t_1) \quad (2.13)$$

が成り立つ。この (2.13) 式は、マイクロホン位置 M_1, M_3 を焦点とした双曲線上にある点

2.5 3次元空間での音源位置推定

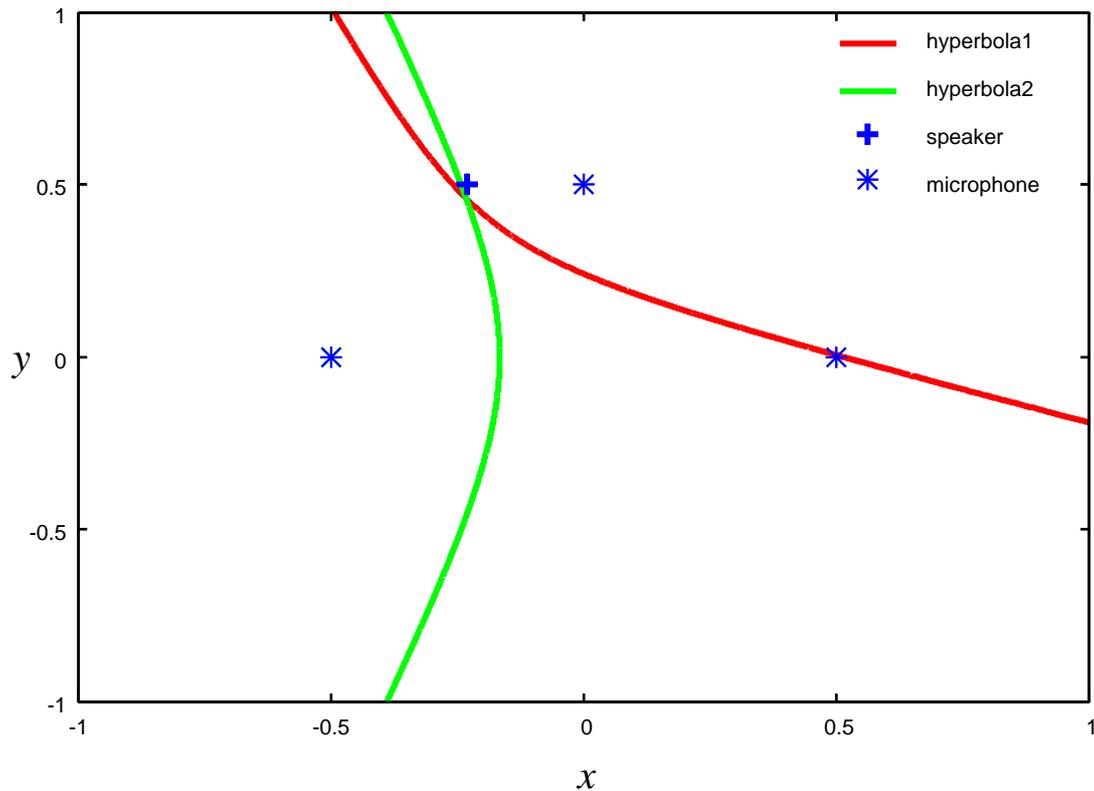


図 2.5 双曲線同士の交点

を表している。この (2.12), (2.13) 式より, 連立方程式

$$\begin{cases} \sqrt{(Mx_2 - Sx)^2 + (My_2 - Sy)^2} - \sqrt{(Mx_1 - Sx)^2 + (My_1 - Sy)^2} = c(t_2 - t_1) \\ \sqrt{(Mx_3 - Sx)^2 + (My_3 - Sy)^2} - \sqrt{(Mx_1 - Sx)^2 + (My_1 - Sy)^2} = c(t_3 - t_1) \end{cases} \quad (2.14)$$

を立てることができ, この連立方程式を Sx, Sy について解くことにより, 双曲線の交点, つまり, 平面上での音源の位置 $S = (Sx, Sy)$ を推定することができる。

2.5 3次元空間での音源位置推定

3次元空間において音源位置推定を行う場合, 平面上での位置推定と同様に, 音の到着時間差を用いる。しかし, 3次元での位置推定は座標軸が1つ増えるため, 音源位置の候補点の集合は双曲線を回転させた双曲面となる。2つの双曲面の交点は複数存在するため, 3本のマイクロホンのみでは音源の3次元座標を求めることができない, よって, 3次元空間で

2.5 3次元空間での音源位置推定

音源の位置を推定するためには4本以上のマイクロホンが必要である。ここでは4本のマイクロホンを用いて3次元空間で音源位置推定を行う方法について説明する。

2.5.1 4本のマイクロホンを用いた推定方法

音源の3次元位置ベクトル S を $S = (Sx, Sy, Sz)$, 各マイクロホンの3次元位置ベクトル M_1, M_2, M_3, M_4 をそれぞれ $M_1 = (Mx_1, My_1, Mz_1)$, $M_2 = (Mx_2, My_2, Mz_2)$, $M_3 = (Mx_3, My_3, Mz_3)$, $M_4 = (Mx_4, My_4, Mz_4)$, 各マイクロホンに音が到達した時刻を t_1, t_2, t_3, t_4 とする。ここで M_1 を基準のマイクロホンとすると, 各マイクロホンと基準マイクロホン間の3つの到着時間差 $(t_2 - t_1)$, $(t_3 - t_1)$, $(t_4 - t_1)$, が求められる。平面上の位置推定と同様に到着時間差から, 2本のマイクロホンを焦点とした双曲線を描画できるが, 3次元空間のため, 双曲線ではなく, 双曲面を描く必要がある。 $(t_2 - t_1)$ から, マイクロホン M_1, M_2 を焦点とした双曲面上に存在する点は,

$$\|M_2 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_2 - t_1) \quad (2.15)$$

で表される。ここで $\|M_1\|$ は3次元位置ベクトル M_1 のノルム

$$\|M_1\| = \sqrt{Mx_1^2 + My_1^2 + Mz_1^2} \quad (2.16)$$

を表している。また, $\|M_1 - S\|$ は

$$\|M_1 - S\| = \sqrt{(Mx_1 - Sx)^2 + (My_1 - Sy)^2 + (Mz_1 - Sz)^2} \quad (2.17)$$

を表している。また, 式 (2.15) と同様に $(t_3 - t_1)$ から, マイクロホン M_1, M_3 を焦点とした双曲面上に存在する点は,

$$\|M_3 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_3 - t_1) \quad (2.18)$$

で表され, 同様に, $(t_4 - t_1)$ から, マイクロホン M_1, M_4 を焦点とした双曲面上に存在する点は,

$$\|M_4 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_4 - t_1) \quad (2.19)$$

2.6 音源位置推定の計算機シミュレーション

と表すことができる．式 (2.15), (2.18), (2.19) より，連立方程式

$$\begin{cases} \|M_2 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_2 - t_1) \\ \|M_3 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_3 - t_1) \\ \|M_4 - S\| - \|M_1 - S\| = c(t_4 - t_1) \end{cases} \quad (2.20)$$

を立てることができる．この連立方程式を S_x, S_y, S_z についてそれぞれ解くことにより，3つの双曲面の交点である $S = (S_x, S_y, S_z)$ を求めることができ，3次元空間での音源位置推定が可能となる．

2.6 音源位置推定の計算機シミュレーション

3次元空間での音源の位置推定が前節の方法で可能であるかどうか，計算機シミュレーションによって確認を行った．このとき用いた，マイクロホン，スピーカの位置パラメータを表 2.3 に示す．

表 2.3 計算機シミュレーションでのマイクロホン，スピーカ座標

	マイクロホン座標 (m)				スピーカ座標 (m)
	M_1	M_2	M_3	M_4	S
x	0.00	-1.00	1.00	0.00	-1.00
y	0.50	0.00	0.00	1.00	1.00
z	1.50	0.50	0.50	0.30	0.30

ここで，サンプリング周波数を 48KHz，音速を 340m/s とすると，音源からマイクロホンまでの距離差から，マイクロホン M_1, M_2 間の到着時間差は -87.574312 サンプル， M_1, M_3 間の到着時間差は 85.393763 サンプル， M_1, M_4 間の到着時間差は -90.370157 サンプルとなる．この時間差とマイクロホン位置から (2.20) 式の連立方程式を解いたところ，音源 S の推定位置は $S = (-1.000000, 1.000000, 0.300000)$ となり，3次元空間での正確な音源位置を推定できることを確認した．

2.7 音源位置推定の実験

3次元空間での音源位置推定ができるかどうか，実験によって確認する．実際に4本のマイクロホンを用いてスピーカからの音を録音し，音源の3次元位置推定を行う．まず，実験を行う方法を示し，その実験によって得られた結果を示す．

2.7.1 実験方法

実験の方法について説明する．実験は研究室 (A260) の輪講スペースで行う．音源にはスピーカから流す白色雑音を用いる．マイクロホンの配置を固定し，スピーカの位置を変化させながら音源の位置を推定することにより，推定性能の確認を行う．マイクロホンの配置を図 2.6，図 2.7 のように4本のマイクロホンが同一平面上に存在しないように配置する．このときの各マイクロホンの座標を表 2.4 に示す．図 2.6，図 2.7 の写真はマイクロホンの配置のみを示したものであり，撮影場所は実験場所とは異なる．ここで， x 軸， y 軸は図 2.8 に示すように x 軸を左右方向， y 軸を前後方向と設定する．図 2.8 はマイクロホン配置を真上から見た平面図である． z 軸は高さとし，地面を 0 とする．

実験ではサンプリング周波数を 48KHz，音速を 340m/s とする．音源の位置座標はスピーカのツイーター部分とする．これは2本のマイクロホンを用いてインパルス応答を測定した際に，マイクロホン間の位相差が 0 になる点であったからである．

まず，図 2.9 に示すようにスピーカの y 軸の値を 160cm， z 軸の値を 78cm に固定し， x 軸の値を -90cm から 90cm の範囲で変化させながら位置推定を行う．その後，図 2.10 に示すようにスピーカの x 軸の値を 100cm， z 軸の値を 78cm に固定し， y 軸の値を 0cm から 150cm の範囲で変化させながら位置推定を行う．ここでスピーカの移動間隔は 30cm とする．

2.7 音源位置推定の実験

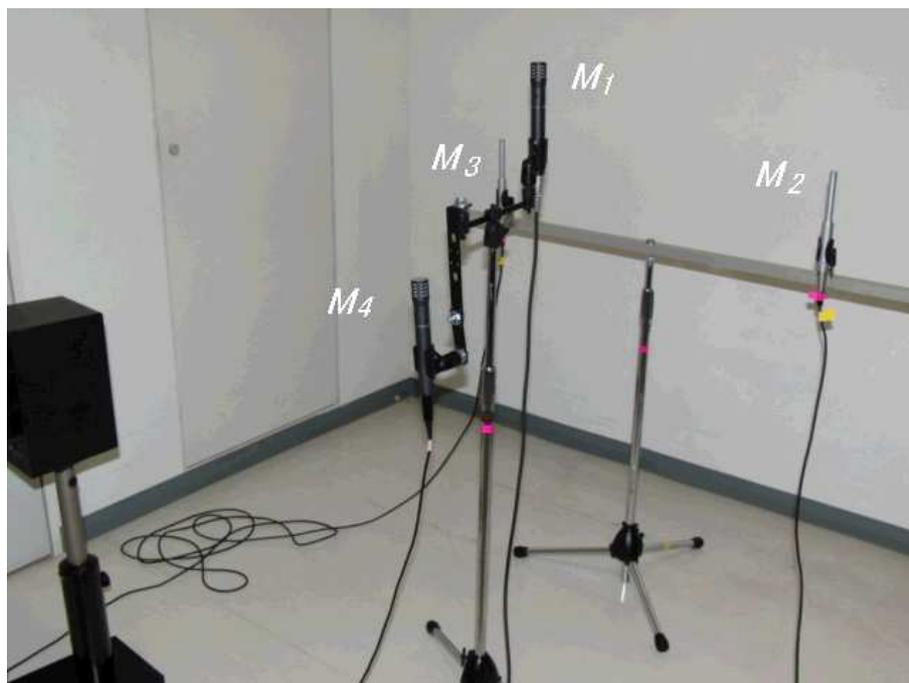


図 2.6 実験でのマイクロホン配置 1

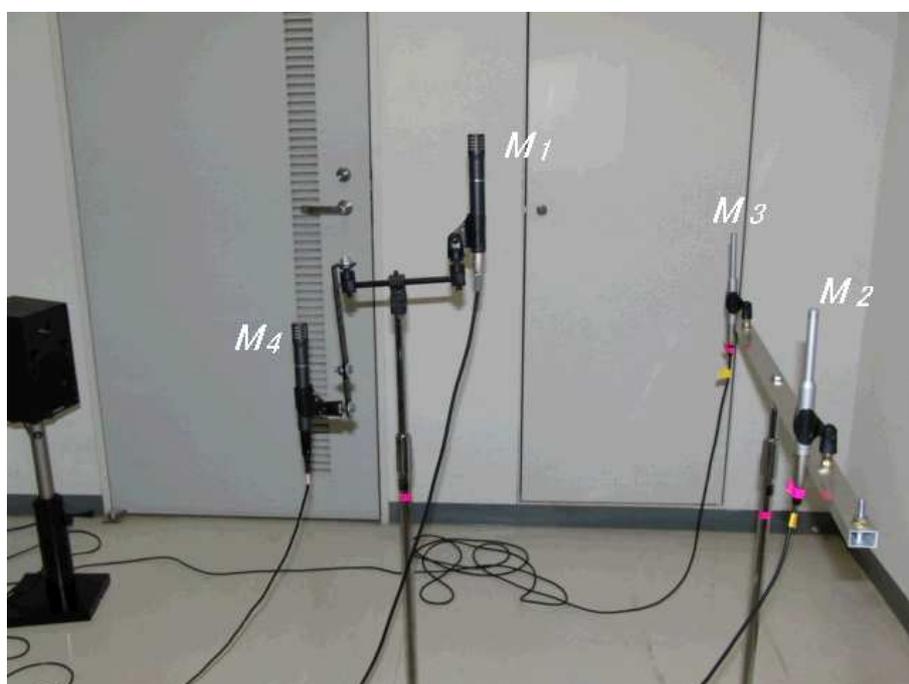


図 2.7 実験でのマイクロホン配置 2

2.7 音源位置推定の実験

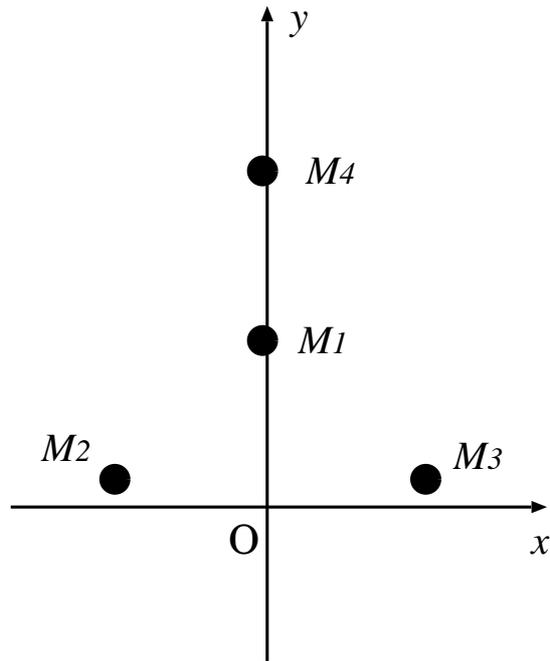


図 2.8 実験での x 軸, y 軸

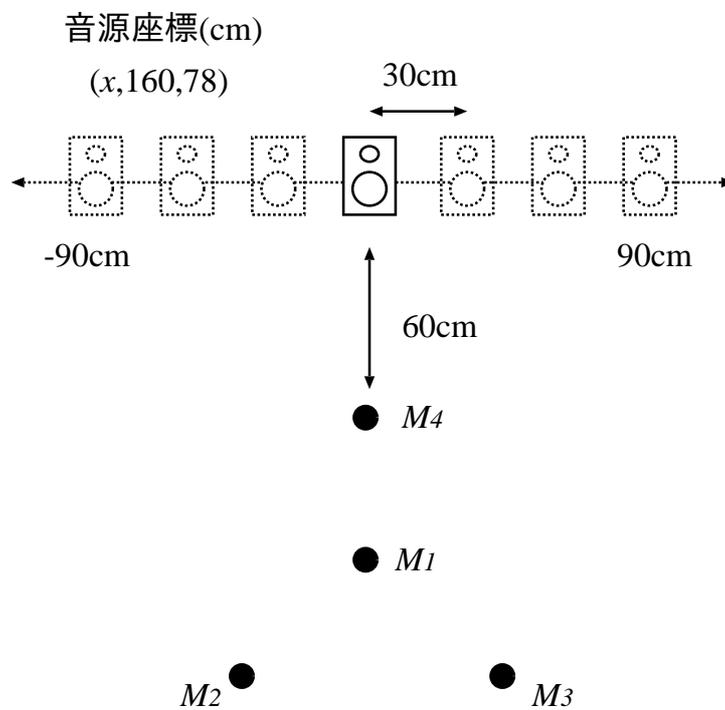


図 2.9 音源の x 軸を変化させながら推定

2.7 音源位置推定の実験

表 2.4 実験での4本のマイクロホン座標

マイクロホン座標 (m)				
	M_1	M_2	M_3	M_4
x	0.00	-0.41	0.41	0.00
y	0.72	0.04	0.04	0.98
z	1.42	0.74	0.74	1.10

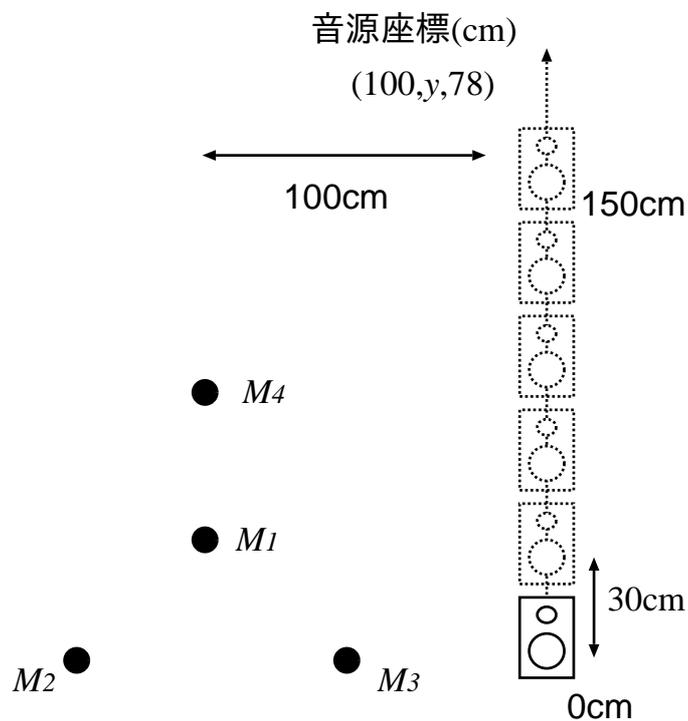


図 2.10 音源の y 軸を変化させながら推定

2.7.2 実験結果

実際に実験を行った結果を示す。スピーカの y 軸と z 軸の値を固定し、 x 軸の値を変化させながら位置推定を行った結果を表 2.5 に示す。また、スピーカの x 軸と z 軸の値を固定し、 y 軸の値を変化させながら位置推定を行った結果を表 2.6 に示す。この結果から、正確な音源位置を推定できている場合と、誤差が大きく、正確な推定ができていない場合があることが確認できる。

2.8 推定誤差についての検証

表 2.5 音源位置の x 軸を変化させながら推定した結果

スピーカ位置 (m)			推定位置 (m)		
x	y	z	x	y	z
-0.90	1.60	0.78	-0.87	1.58	0.76
-0.60	1.60	0.78	-0.59	1.58	0.75
-0.30	1.60	0.78	-0.31	1.60	0.75
0.00	1.60	0.78	-0.03	1.48	0.78
0.30	1.60	0.78	0.22	1.38	0.81
0.60	1.60	0.78	0.49	1.43	0.80
0.90	1.60	0.78	0.85	1.65	0.73

表 2.6 音源位置の y 軸を変化させながら推定した結果

スピーカ位置 (m)			推定位置 (m)		
x	y	z	x	y	z
1.00	0.00	0.78	0.72	0.13	0.80
1.00	0.30	0.78	0.90	0.33	0.76
1.00	0.60	0.78	0.95	0.60	0.75
1.00	0.90	0.78	0.96	0.88	0.73
1.00	1.20	0.78	0.96	1.17	0.74
1.00	1.50	0.78	0.93	1.43	0.76

2.8 推定誤差についての検証

実験によって、音源の3次元座標を4本のマイクロホンを用いて推定できることを確認したが、推定結果に大きく誤差があり、正確な音源位置を推定できていない場合があった。本節ではこの誤差についての検証を行う。

2.8 推定誤差についての検証

2.8.1 実験での推定誤差

音源位置の x 軸座標を変化させながら実験を行った際の推定誤差を図 2.11 に示す。また、このときの平均誤差と最大誤差を表 2.7 に示す。同様に音源位置の y 軸座標を変化させながら実験を行った際の推定誤差を図 2.12 に示し、このときの平均誤差と最大誤差を表 2.8 に示す。この結果から、最大で約 30cm の誤差が確認でき、安定した位置推定ができていないことが確認できる。そのため、この誤差について検証し、誤差を少なくする方法を提案する必要がある。

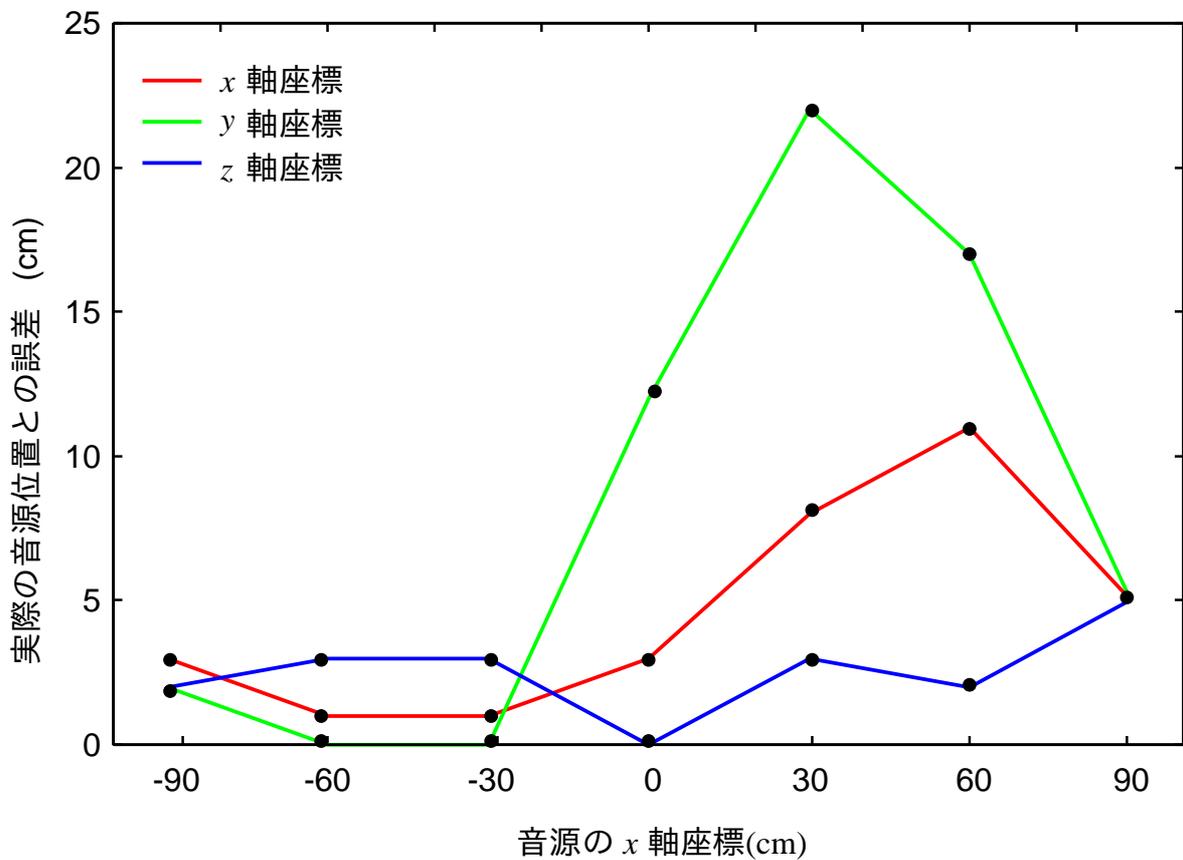


図 2.11 音源位置の x 軸を変化させた場合の推定誤差

2.8 推定誤差についての検証

表 2.7 音源位置の x 軸を変化させた場合の平均誤差と最大誤差

	平均誤差 (cm)	最大誤差 (cm)
x 軸	4.57	11
y 軸	8.29	22
z 軸	2.57	5

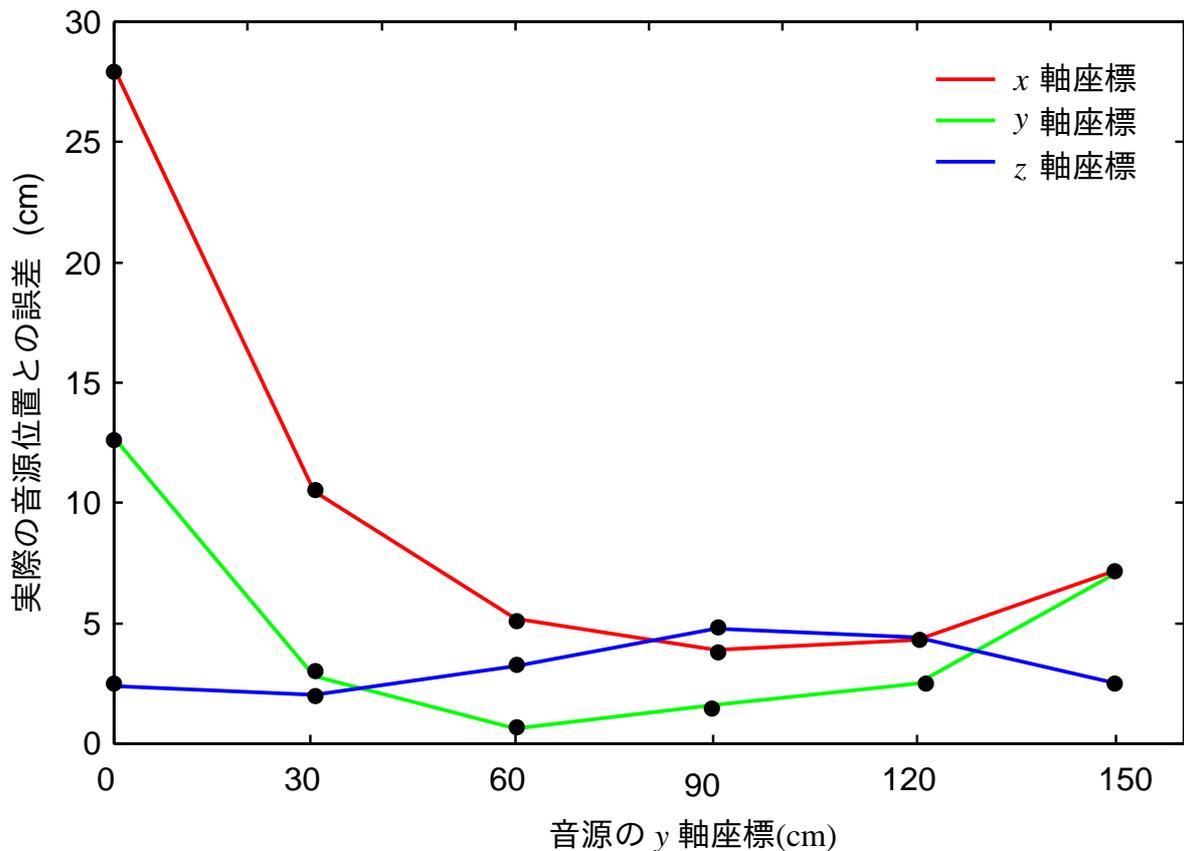


図 2.12 音源位置の y 軸を変化させた場合の推定誤差

2.8.2 到着時間差の誤差

推定結果の誤差の原因として、マイクロホン間の到着時間差に誤差があると考えられる。実験において、音源位置の x 軸を変化させた場合の各マイクロホン間の到着時間差の誤差を図 2.13 に示す。このときの到着時間差の誤差は平均で 1.79 サンプル、最大で 4.10 サンプルであった。また、音源位置の y 軸を変化させた場合の各マイクロホン間の到着時間差の誤

2.8 推定誤差についての検証

表 2.8 音源位置の y 軸を変化させた場合の平均誤差と最大誤差

	平均誤差 (cm)	最大誤差 (cm)
x 軸	9.87	28.1
y 軸	4.55	12.7
z 軸	3.22	4.8

差を図 2.14 に示す。このときの到着時間差の誤差は平均で 2.97 サンプル、最大で 7.10 サンプルであった。本研究ではサンプリング周波数を 48KHz としているため、1 サンプルを距離に置き換えると、

$$\frac{340(\text{m})}{48000(\text{Hz})} = 0.00708(\text{m}) \quad (2.21)$$

約 7mm の誤差となる、また 4.10 サンプルでは約 3cm、7.10 サンプルでは約 5cm の誤差となる。つまり、音源から各マイクロホン間の距離の差に、最大で 5cm の誤差があることになる。

また、本研究では 48KHz でサンプリングを行っているため、 $\frac{1}{48000}$ 秒未満の時間を検出することができない。つまり、1 サンプル未満の正確な到着時間差を求めることができないため、サンプル単位で正確な到着時間差を求められた場合でも、1 サンプル未満の誤差が存在する可能性が高い。

2.8.3 到着時間差の誤差による推定結果への影響

マイクロホン間の到着時間差の誤差による推定結果への影響を計算機シミュレーションによって検証する。

シミュレーション方法

計算機シミュレーションの方法について説明する。マイクロホンの配置は図 2.15 に示すように x 、 $-x$ 、 y 、 z 軸の方向へそれぞれ配置する。また、マイクロホン間の間隔の違いに

2.8 推定誤差についての検証

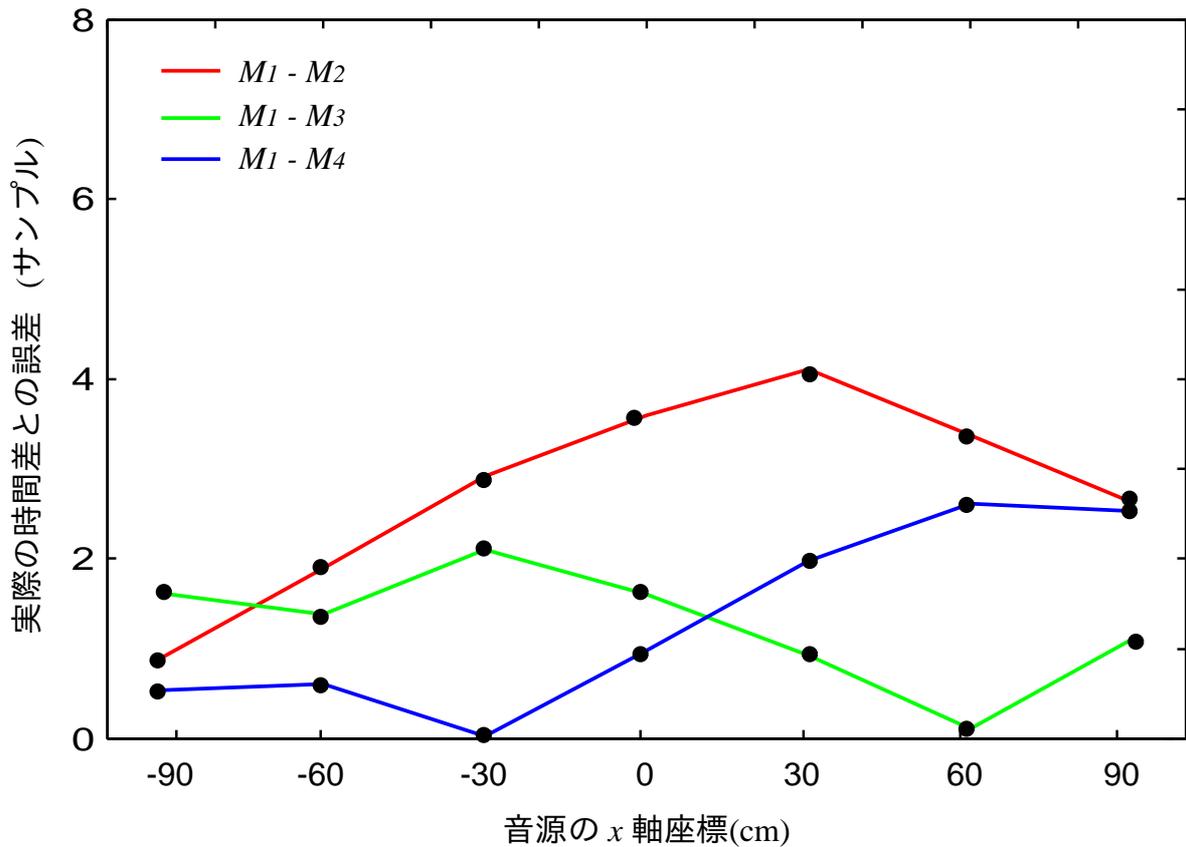


図 2.13 音源位置の x 軸を変化させた場合の時間差誤差

よる誤差の影響を検証するため，原点から各マイクロホンまでの距離をそれぞれの方向へ広げながらシミュレーションを行う．原点から各マイクロホンまでの距離はそれぞれ 50cm, 75cm, 100cm, 125cm とする．音源位置は一例として (-100cm, 130cm, 80cm) とする．音源から各マイクロホン間の距離差を求め，距離差を到着時間差のサンプル数に変換する．その後， M_1 と M_4 間の到着時間差に意図的に誤差をつけることにより，到着時間差の誤差による推定結果への影響を検証する．

シミュレーション結果

シミュレーションの結果を図 2.16 に示す．この結果から，マイクロホンの間隔が狭い場合，少しの到着時間差の誤差が位置推定の結果に大きな誤差となって現れていることが解

2.8 推定誤差についての検証

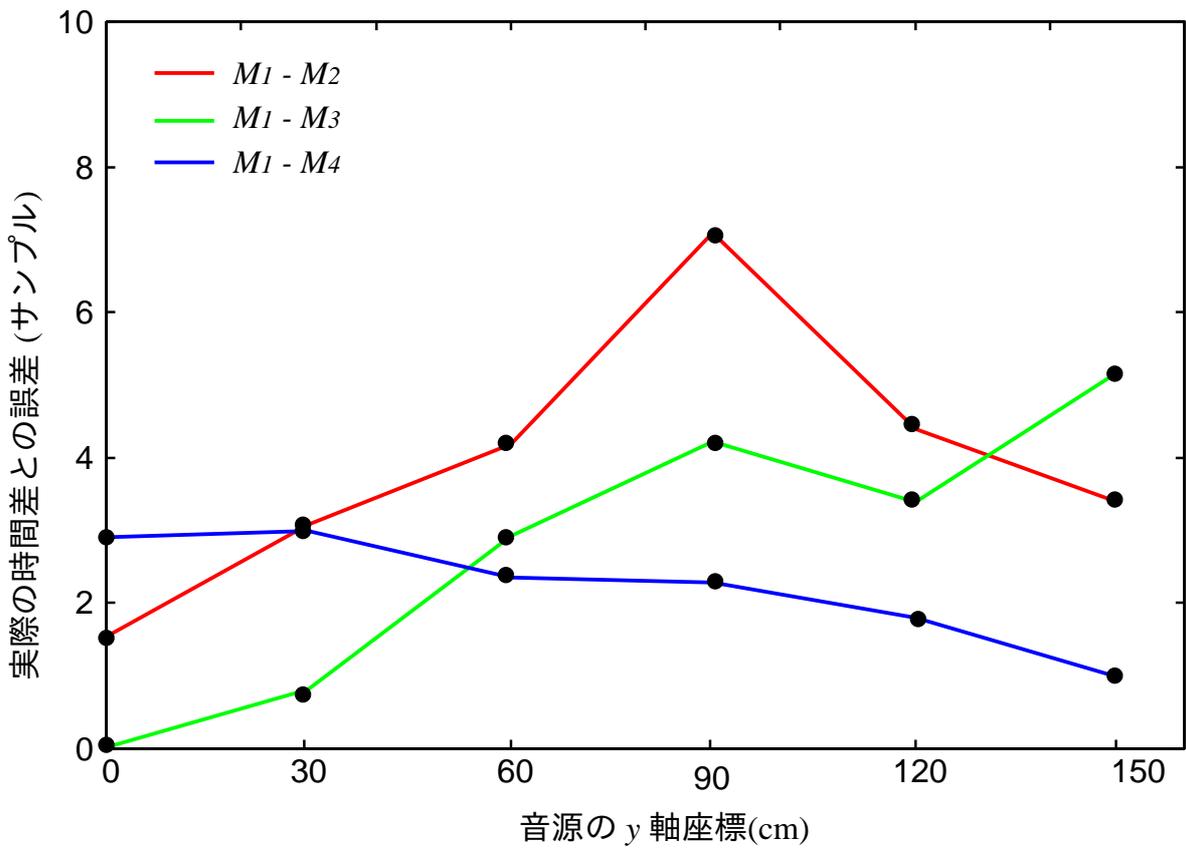


図 2.14 音源位置の y 軸を変化させた場合の時間差誤差

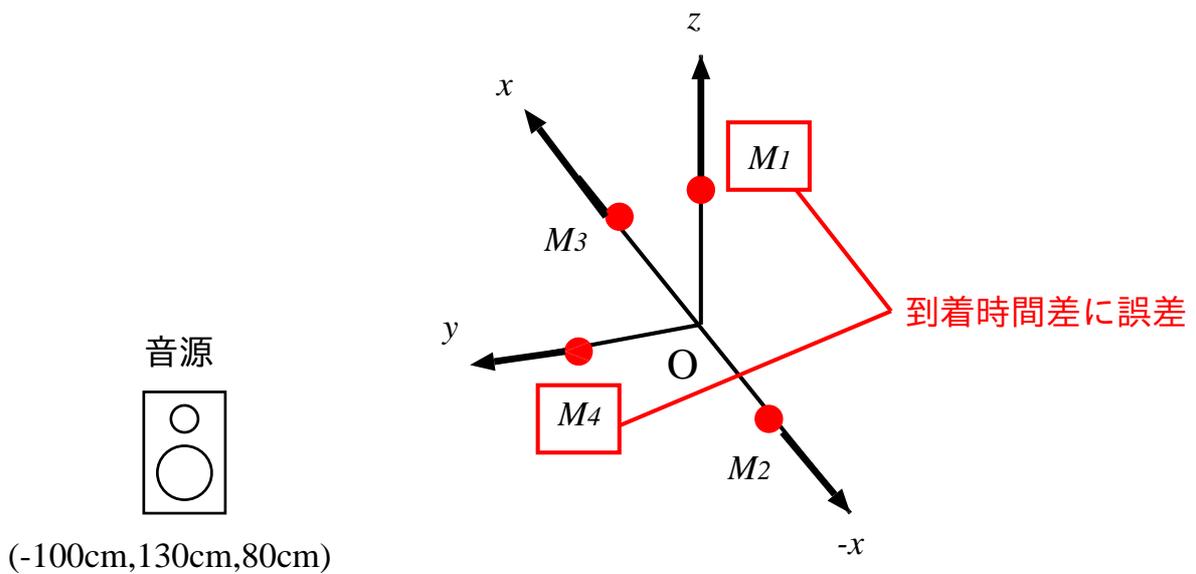


図 2.15 シミュレーション方法

2.8 推定誤差についての検証

る。また、マイクロホンの間隔が広がるにつれ、到着時間差の誤差による位置推定結果への影響が少なくなっていることが解る。また、同様のシミュレーションを実験でのマイクロホン配置で行った。実験でのマイクロホン配置に対するシミュレーションの結果を図 2.17 に示す。

このシミュレーションの結果から、少しの到着時間差の誤差が音源位置推定の結果に大きな影響を与えていることが解った。また、マイクロホンの間隔を広げることによって、到着時間差の影響を少なくなることが解った。

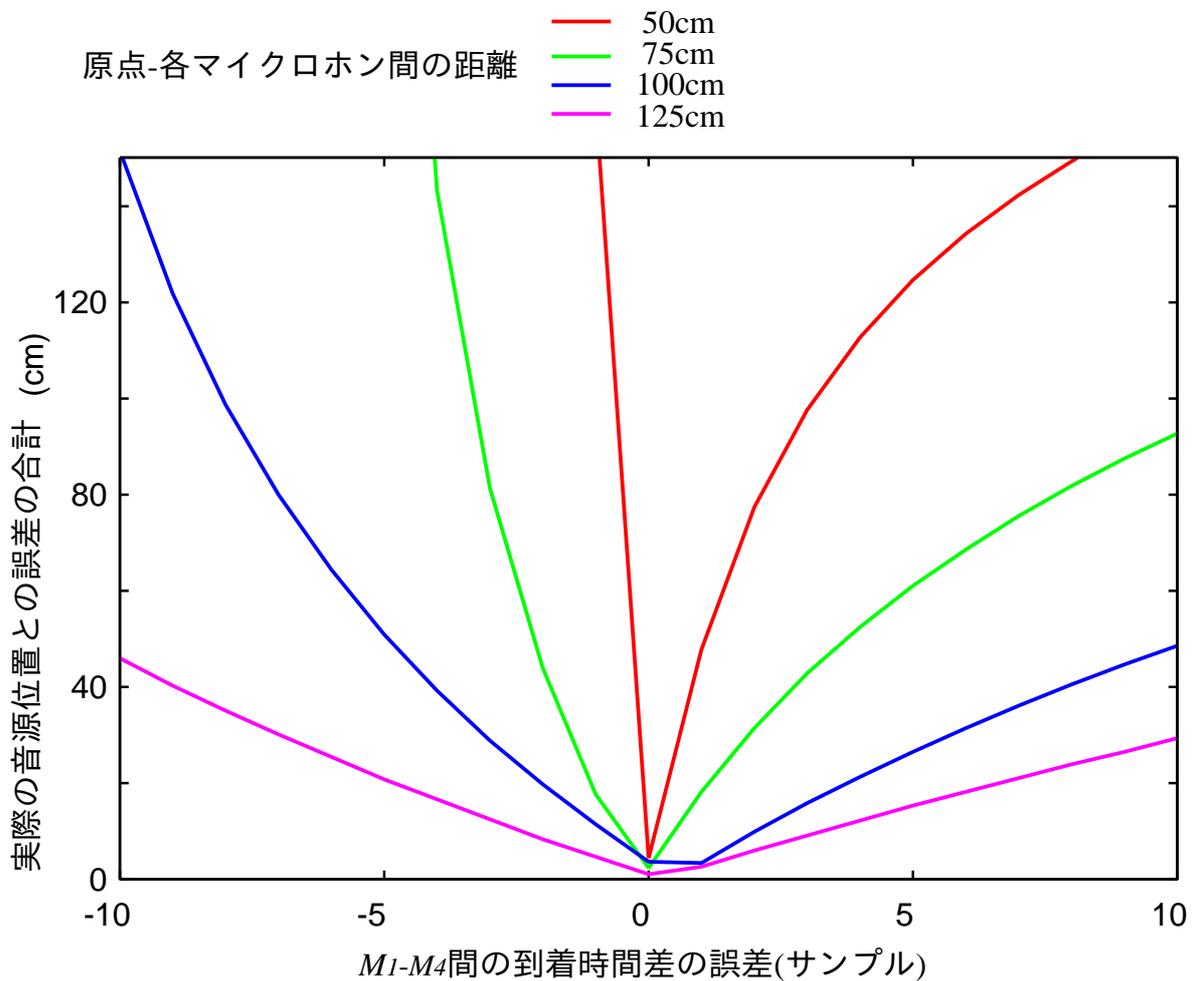


図 2.16 シミュレーション結果

2.8 推定誤差についての検証

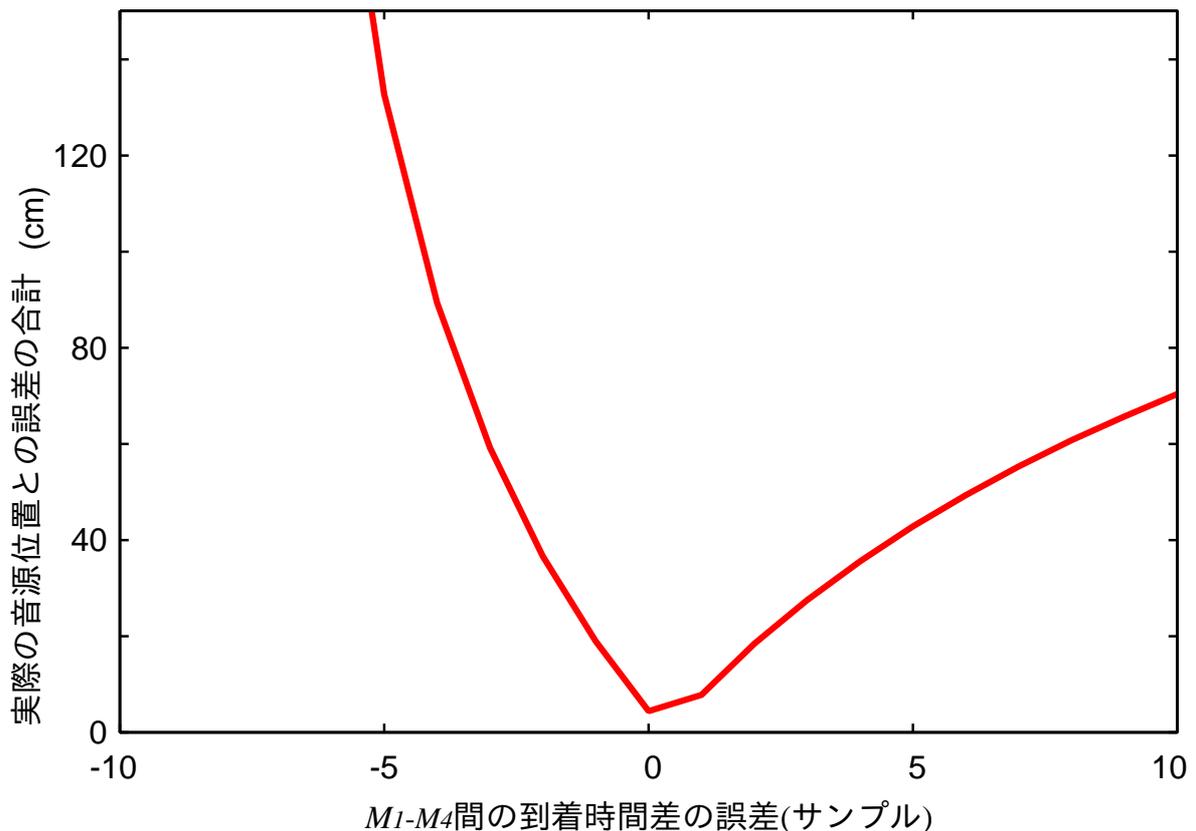


図 2.17 実験でのマイクロホン配置に対するシミュレーション結果

マイクロホン間隔による誤差の影響についての考察

計算機シミュレーションによって、マイクロホン間隔を広げることで誤差の影響を少なくできることが解った。このマイクロホン間隔による誤差の影響について考察する。平面上において2つのマイクロホン M_1 , M_2 の間隔が8 サンプルの距離であった場合、図 2.18 に示すようにマイクロホンの間に7本の双曲線を描くことができる。また、音の到着時間差がマイクロホン間の距離と等しい場合、双曲線は2つのマイクロホンに対し、水平に延びる直線となる。つまり、2つのマイクロホン間隔が8 サンプルの場合、描くことのできる双曲線は9本となる。同様に2つのマイクロホン M_1 , M_2 の間隔が14 サンプルの距離であった場合、図 2.19 に示すように15本の双曲線を描くことができる。このように、マイクロホン間隔を広げることによって、描くことのできる双曲線の数が増えるため、誤差の影響を少なくできると考えられる。つまり、マイクロホン間隔が8 サンプルの場合では、

2.8 推定誤差についての検証

1 サンプルは全体の $1/8$ なのに対して、マイクロホン間隔が 14 サンプルの場合、1 サンプルは全体の $1/14$ であり、同じ 1 サンプルの誤差でも、マイクロホン間隔を広げることによって相対的に誤差を小さくすることができる。また、サンプリング周波数を高くすることで、描くことのできる双曲線の数を増やすことができると考えられる。

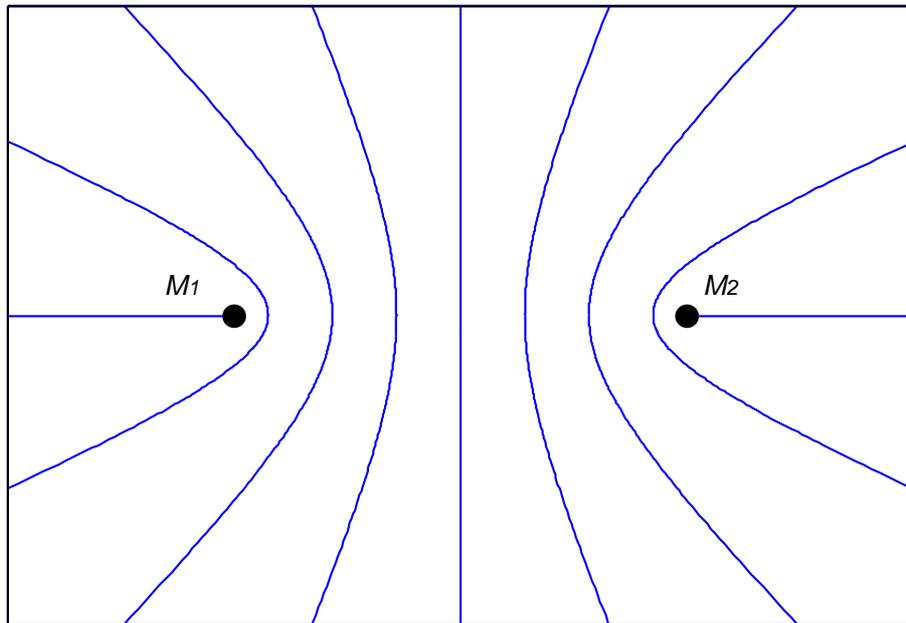


図 2.18 マイクロホン間隔が 8 サンプルの場合

サンプリング周波数の違いによる誤差の影響

マイクロホン間に描くことのできる双曲線の数、サンプリング周波数を高くすることでも増やすことができる。サンプリング周波数の違いによる誤差の影響を計算機シミュレーションによって検証する。計算機シミュレーションの方法について説明する。先程のシミュレーションと同様に、マイクロホンの配置は x , $-x$, y , z 軸の方向へそれぞれ配置する。それぞれのマイクロホンの座標を表 2.9 に示す。先程と同様に音源位置は一例として $(-100\text{cm}, 130\text{cm}, 80\text{cm})$ とする。サンプリング周波数はそれぞれ、48KHz, 96KHz, 144KHz とする。音源から各マイクロホン間の距離差を求め、距離差を到着時間差のサンプル数に変換する。その後、 M_1 と M_4 間の到着時間差に意図的に誤差をつけることにより、到着時間

2.8 推定誤差についての検証

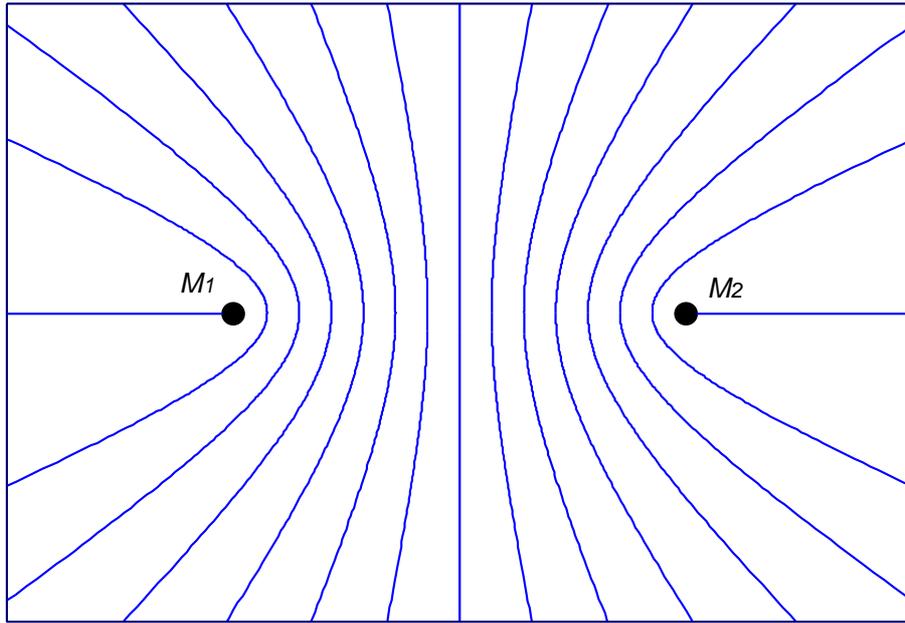


図 2.19 マイクロホン間隔が 14 サンプルの場合

差の誤差による推定結果への影響を検証する。

計算機シミュレーションの結果を図 2.20 に示す。この結果からサンプリング周波数を高くすることによって、到着時間差の誤差による影響を少なくすることができるが解る。

表 2.9 計算機シミュレーションでの各マイクロホンの座標

	マイクロホン座標 (m)			
	M_1	M_2	M_3	M_4
x	0.00	-0.50	0.50	0.00
y	0.00	0.00	0.00	0.50
z	0.50	0.00	0.00	0.00

サンプリング周波数とマイクロホン間隔についての考察

計算機シミュレーションの結果から、マイクロホンの間隔を広げる、または、サンプリング周波数を高くすることにより、到着時間差の誤差による推定結果への影響を少なくできる

2.8 推定誤差についての検証

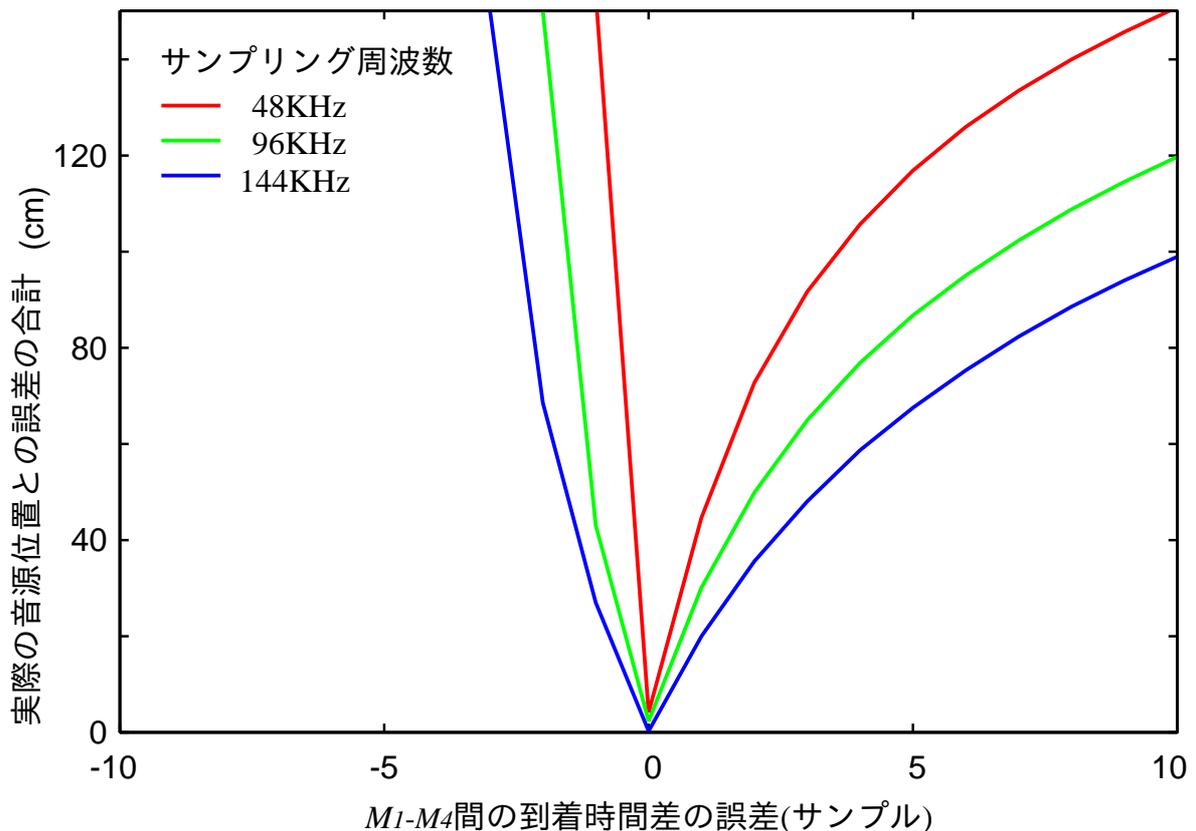


図 2.20 サンプル周波数の違いによる誤差の影響

ことが解った．しかしながら，マイクロホン間隔を 2 倍にした場合に比べ，サンプル周波数を 2 倍にした場合，描くことのできる双曲線の数等は等しいが，誤差の影響は大きかった．これは，マイクロホンと音源の距離に関係があると考えられる．

平面上において 2 つのマイクロホン M_1 , M_2 の間隔が 8 サンプルの距離であった場合 M_1 , M_2 間に 9 本の双曲線を描くことができる．また， M_1 から斜め方向に 8 サンプルの位置にマイクロホン M_3 を配置すると，同様に M_1 , M_3 間に 9 本の双曲線を描くことができる． M_1 , M_2 間の双曲線と M_1 , M_3 間の双曲線が全ての場合において交点を持つと仮定すれば，81 の交点が存在する．つまり，音源位置の推定結果はこの 81 箇所のどこかとなる．しかし，交点が存在しない場合もあるため，音源位置の推定結果は 81 箇所よりも少なくなる．このときのすべての交点を図 2.21 に示す．この結果から，双曲線の交点はマイクロホンの周辺に多く存在し，マイクロホンから離れた場所の交点は少ないことが解る．また，2

2.8 推定誤差についての検証

つのマイクロホン M_1 , M_2 の間隔が 14 サンプルの距離であった場合, M_1 から斜め方向に 14 サンプルの位置にマイクロホン M_3 を配置すると, 音源位置の推定結果は 225 箇所どころかとなるが, 交点が存在しない場合もあるため, 音源位置の推定結果は 225 箇所よりも少なくなる. このときのすべての交点を図 2.22 に示す. この結果から, マイクロホン間のサンプル数を増やした場合でも, 双曲線の交点はマイクロホン周辺に多く存在し, マイクロホンから離れた場所の交点は少ないことが解る. つまり, マイクロホンから離れた音源の場合, マイクロホン間のサンプル数が多い場合でも, 時間差誤差の影響が大きいということが解る.

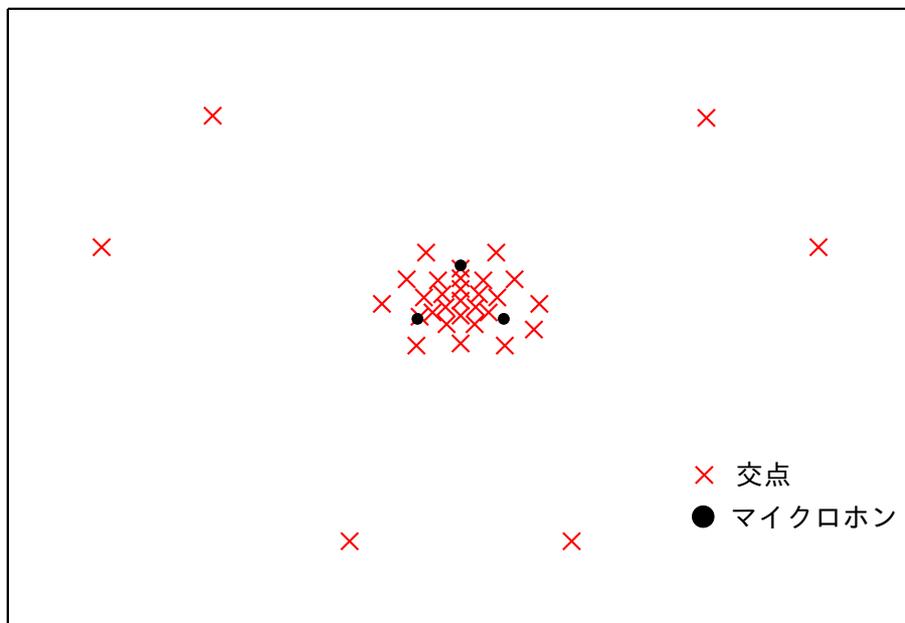


図 2.21 マイクロホン間隔が 8 サンプルの場合のすべての交点

2.8 推定誤差についての検証

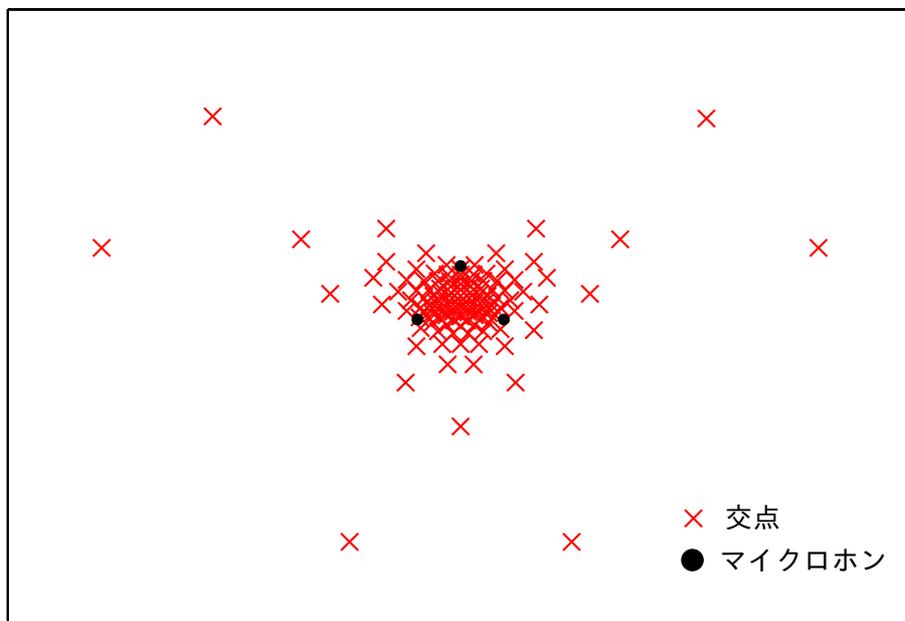


図 2.22 マイクロホン間隔が 14 サンプルの場合のすべての交点

第 3 章

結論

3.1 本研究のまとめ

マイクロホンアレイを用いた受音方法では、指向性の制御が可能となり、音源位置に対して指向性を形成することで受音信号の S/N 比を向上させることができる。しかし、受音対象が移動した場合など、音源の変化に合わせて指向性の制御を行う必要があるため、常に音源の位置情報を検出しなければならないといった問題がある。この問題の解決策として、これまでに音源の到来方向や平面上での音源位置を推定する方法等があるが、これらの方法では 3 次元空間における正確な音源位置を推定することができない。

そこで本研究では、4 本のマイクロホンを用いて音源の 3 次元位置を推定できるか確認を行った。各マイクロホン間の音の到着時間差を相互相関によって求め、音の到着時間差と各マイクロホンの位置情報から音源の 3 次元位置情報を求めた。実際に実験を行い、4 本のマイクロホンを用いることによって、誤差はあるが音源の 3 次元位置情報の推定が可能であることを確認した。この推定結果の誤差についての検証を行い、マイクロホン間の音の到着時間差の誤差が位置推定の結果に大きな影響を与えていることを確認した。また、マイクロホン間隔を広げる、またはサンプリング周波数を高くすることにより、音の到着時間差の誤差による推定結果への影響を少なくできることを確認した。

この推定結果を用いることにより、マイクロホンアレイの指向性を受音対象に対してより正確に向けることができ、受音信号の S/N 比をさらに向上させることができると考えられる。

3.2 今後の課題

3.2 今後の課題

今回の実験では、正確な音源位置を推定できている場合と、誤差が大きく正確な音源位置を推定できていない場合があった。音の到着時間差を正確に求めることができた場合に、音源の正確な位置を推定できることを確認している。この正確な音の到着時間差を求めることによって、誤差の少ない安定した推定結果が得られると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたって、論文やプレゼン、梗概の添削、研究での有益な助言など様々な御指導をして頂いた福本昌弘教授に心から感謝いたします。すぐに研究室で寝てしまったり、時間にルーズだったりと色々と申し訳ないことをしてしまいました。

また、本研究の副査をして頂いた島村和典教授、浜村昌則准教授に深く感謝いたします。

佐伯幸郎助教、福富英次助手、同大学院修士課程の徳久翔太氏にも深く感謝いたします。佐伯先生と福富先生には私の研究について一緒に考えて頂き、有益なアドバイスをくださり、非常に感謝しています。お二人の頭の回転についていくのは非常に難しかったですが、おかげで本論文を完成させることができました。徳久氏には甘いものをたくさん差入れして頂き、大変感謝しています。あのドーナツたちは研究での活力となりました。

また、研究室で共に研究を行った学部4年の皆様にも感謝します。安藝君はバイトと研究を両立し、誰よりもまじめに研究に取り組んでおり、その姿は私の目標となりました。畠山君と堀本君にはいつも笑いを提供して頂き感謝しています。松谷君には車で色々なところにつれて行ってもらい感謝しています。みんなでご飯を買いに行ったり、食べに行く時間は最も心の休まる時間でした。最後に、私の学生生活に関わって頂いた全ての方々に感謝致します。

参考文献

- [1] 菊間 信良, “アレーアンテナによる適応信号処理”, 科学技術出版, 1999.
- [2] 永田仁史, 阿倍正人, “話者追尾 2 チャンネルマイクロホンアレーに関する検討”, 信学論 (A), vol.J82-A, no.6, pp.860-866, Jun, 1999
- [3] 大屋 紀雄, 中村 正孝 “到来時間遅れに基づく音源方向推定の直交マイクロホン対受音による高精度化” 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 104(454), 19-24, 2004-11-18
- [4] 谷川 真一, 浜田 望 “2 チャンネルマイクロホンアレーの仮想多チャンネル化による音声の到来方向推定法” 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 J85-A(2), 153-161, 2002-02-01
- [5] F.Asano, H.Asoh and T.Matsui, “Sound Source Localization and Separation in Near Fiel”, to be appear in IEICE Trans. Fundamental, Vol.E83-A, No.11, October, 2000.
- [6] 西浦 敬信, 山田 武志, 中村 哲, 鹿野 清宏 “マイクロホンアレーを用いた CSP 法に基づく複数音源位置推定” 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J83-D-II(8), 1713-1721, 2000-08-25
- [7] 三谷 政昭, “やり直しのための信号数学”, CQ 出版社, 2005.