修士論文

健康増進機能を備えた電動車椅子の座面姿勢制御

The Control of the Seat Posture for the Motorized Wheelchair
with the Function of Health Promotion

高知工科大学大学院基盤工学専攻知能機械システム工学コース
1055045
隅田由紀

目次

第１章　序章　1
1.1　背景　1
1.2　研究目的　8
1.3　論文の構成　10

第２章　電動車椅子の概要　11
2.1　健康増進機能　11
2.2　円板と他の機械要素との比較　13

第３章　座面の運動方程式　16
3.1　電動車椅子の座面の運動方程式　16
3.2　ラグランジュ法による運動方程式の導出　27
3.3　シミュレーション　29

第４章　座面姿勢制御　36
4.1　システム構成　36
4.2　制御実験　37

第５章　結章　47
5.1　人体への効果検証　47
5.2　まとめ　60

参考資料　62
参考文献　81
謝辞　82

第 1 章

序章

１．１　背景

厚生労働省の身体障害児・者実態調査結果（平成１３年６月１日調査）[1]から障害の種類別にみると，表 1.1 からも分かるように視覚障害者が 301,000 人，聴覚・言語障害者が 346,000 人，肢体不自由者が 1,749,000 人であり，肢体不自由者が全体の 53.9%を占める．また，前回調査（平成８年 11 月）と比較すると，視覚障害，聴覚・言語障害はほぼ横ばいであり，肢体不自由 5.6%増，内部障害は 36.7%増となっている．

推計数（単位：千人）						
	総数	視覚障害	聴覚・言語障害	肢体不自由	内部障害	重複障害（再掲）
昭和 26 年	512	121	100	291	-	-
30 年	785	179	130	476	-	-
35 年	829	202	141	486	-	44
40 年	1,048	234	204	610	-	215
45 年	1,314	250	235	763	66	121
55 年	1,977	336	317	1,127	197	150
62 年	2,413	307	354	1,460	292	156
平成 3 年	2,722	353	358	1,553	458	121
8 年	2,933	305	350	1,657	621	179
13 年	3,245	301	346	1,749	849	175
構成比（単位：%）						
昭和 26 年	100.0	23.6	19.5	56.8	-	-

30 年	100.0	22.8	16.6	60.6	-	-
35 年	100.0	24.4	17.0	58.6	-	5.3
40 年	100.0	22.3	19.5	58.2	-	20.5
45 年	100.0	19.0	17.9	58.1	5.0	9.2
55 年	100.0	17.0	16.0	57.0	10.0	7.6
62 年	100.0	12.7	14.7	60.5	12.1	6.5
平成 3 年	100.0	13.0	13.2	57.1	16.8	4.4
8 年	100.0	10.4	11.9	56.5	21.2	6.1
13 年	100.0	9.3	10.7	53.9	26.2	5.4
対前回比（単位：%）						
昭和 26 年						
30 年	153.3	147.9	130.0	163.6	-	-
35 年	105.6	112.8	108.5	102.1	-	-
40 年	126.4	115.8	144.7	125.5	-	488.6
45 年	125.4	106.8	115.2	125.1	-	56.3
55 年	150.5	134.4	134.9	147.7	298.5	124.0
62 年	122.1	91.4	111.7	129.5	148.2	104.0
平成 3 年	112.8	115.0	101.1	106.4	156.8	77.6
8 年	107.8	86.4	97.8	106.7	135.6	147.9
13 年	110.6	98.7	98.9	105.6	136.7	97.8

表 1.1　障害の種類別にみた身体障害者の年次推移

この肢体不自由者 1,749,000 人のうち，電動車椅子を利用している障害者は 32 人であり，肢体不自由児に関しては１０００人に上る．

補装具の種類	総数	福祉制度	労災制度	年金制度	医療保険制度	その他	制度不詳	（再掲）国の制度で交付
所有者延べ総数	1,503	884	46	32	102	236	203	1,064
	-100	-58.8	-3.1	-2.1	-6.8	-15.7	-13.5	-70.8
義肢	77	41	16	7	4	5	4	68

	-100	-53.2	-20.8	-9.1	-5.2	-6.5	-5.2	-88.3
装具	224	128	9	3	67	11	6	207
	-100	-57.1	-4	-1.3	-29.9	-4.9	-2.7	-92.4
座位保持装置	13	6	-	-	-	4	2	6
	-100	-46.2	-	-	-	-30.8	-15.4	-46.2
盲人安全つえ	69	57	1	-	-	7	4	58
	-100	-82.6	-1.4	-	-	-10.1	-5.8	-84.1
義眼	16	8	1	-	1	4	2	10
	-100	-50	-6.3	-	-6.3	-25	-12.5	-62.5
眼鏡	42	19	1	-	-	9	14	20
	-100	-45.2	-2.4	-	-	-21.4	-33.3	-47.6
点字器	17	11	-	-	-	3	2	11
	-100	-64.7	-	-	-	-17.6	-11.8	-64.7
補聴器	206	146	1	6	-	27	26	153
	-100	-70.9	-0.5	-2.9	-	-13.1	-12.6	-74.3
人工喉頭	10	6	-	-	-	1	3	6
	-100	-60	-	-	-	-10	-30	-60
車いす	302	211	6	15	-	42	29	232
	-100	-69.9	-2	-5	-	-13.9	-9.6	-76.8
電動車いす	32	19	1	1	-	6	6	21
	-100	-59.4	-3.1	-3.1	-	-18.8	-18.8	-65.6
歩行器	31	19	1	-	1	6	4	21
	-100	-61.3	-3.2	-	-3.2	-19.4	-12.9	-67.7
頭部保護帽	7	4	-	-	-	1	1	4
	-100	-57.1	-	-	-	-14.3	-14.3	-57.1
収尿器	31	11	2	-	-	9	8	13
	-100	-35.5	-6.5	-	-	-29	-25.8	-41.9
ストマ用装具	75	65	1	-	-	4	4	66
	-100	-86.7	-1.3	-	-	-5.3	-5.3	-88
歩行補助つえ	350	133	6	-	29	94	88	168
	-100	-38	-1.7	-	-8.3	-26.9	-25.1	-48

表 1.2　制度別補装具の所有の状況（複数回答）

年齢階級別に身体障害者数の構成比をみると，70 歳以上が 45.7%を占めている．また，前回調査と比較すると，65 歳以上の割合が 54.1%から 61.8%に増加しており，高齢化の傾向がうかがえる．

障害の種類別に年齢階級別の分布をみても，いずれも 70 歳以上の割合が最も高く，年齢階級が低くなるにしたがって構成比も低くなることがわかる．

単位 :千人）

		年齢階級別(歳)								
		18～	20～	30～	40～	50～	60～	65～	70～	不詳
	3245	11	70	93	213	468	363	522	1482	22
構成比（%）	100.0	0.3	2.2	2.9	6.6	14.4	11.2	16.1	45.7	0.7
								61.8		
	2933	8	72	111	242	435	378	408	1179	99
構成比（%）	100.0	0.3	2.5	3.8	8.3	14.8	12.9	13.9	40.2	3.4
								54.1		
対前年比	110.6	137.5	97.2	83.8	88	107.6	96	127.9	125.7	22.2
13 年内訳										
視覚障害	301		7	8	16	47	29	37	155	2
構成比（%）	100.0		2.3	2.7	5.3	15.6	9.6	12.3	51.5	0.7
								63.8		
聴覚・言語障害	346	1	9	13	22	38	24	40	195	5
構成比（%）	100.0	0.3	2.6	3.8	6.4	11	6.9	11.6	56.4	1.4
								67.9		
肢体不自由	1749	8	45	59	130	271	198	290	739	9
構成比（%）	100.0	0.5	2.6	3.4	7.4	15.5	11.3	16.6	42.3	0.5
								58.8		
内部障害	849	2	9	13	45	113	112	154	394	6
構成比（%）	100.0	0.2	1.1	1.5	5.3	13.3	13.2	18.1	46.4	0.7
								64.5		

重複障害（再掲）	175	1	3	6	11	10	20	37	86	1
構成比（%）	100.0	0.6	1.7	3.4	6.3	5.7	11.4	21.1	49.1	0.6
								70.3		

表 1.3　障害の種類別，年齢階級別にみた身体障害者の分布状況

身体障害者の人口比は，人口 1,000 人に対して 31.1 人であり，前回に比して 7.6%の増加である．また，年齢階級別にみた身体障害者の出現率は，高年齢になるほど高くなることがわかる．

	総数	18～19歳	20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～64歳	65～69歳	70 歳～
平成 13 年	31.1	3.7	3.9	5.4	13.0	24.2	46.5	72.1	96.2
平成 8 年	28.9	2.3	3.8	7.0	12.2	26.2	49.6	62.3	94.6
対前回比	107.6%	160.9%	102.6%	77.1%	106.6%	92.4%	93.8%	115.7%	101.7%

表 1.4　年齢階級別にみた身体障害者の人口比（対千人）

身体障害者の原因を疾患別にみると，心臓疾患（11.1%），脳血管障害（10.5%），骨関節疾患（8.7%）の割合が高いことがわかる．また，前回調査からの対前回比をみると，肢体不自由の原因となる疾患や，内臓疾患の増加が目立っている

（単位：千人）

疾患名	平成１３年６月		平成８年１１月		対前回比
総数	3,245	-100	2,933	-100	110.60%
脳性マヒ	80	-2.5	74	-2.5	108.10%
脊髄性小児マヒ	55	-1.7	47	-1.6	117.00%
脊髄損傷 I（対マヒ）	58	-1.8	43	-1.5	134.90%
脊髄損傷 II（四肢マヒ）	42	-1.3	33	-1.1	127.30%
進行性筋萎縮性疾患	22	-0.7	13	-0.4	169.20%
脳血管障害	341	-10.5	359	-12.2	95.00%
脳挫傷	17	-0.5	14	-0.5	121.40%

その他の脳神経疾患	72	-2.2	64	-2.2	112.50%
骨関節疾患	281	-8.7	254	-8.7	110.60%
リウマチ性疾患	98	-3	99	-3.4	99.00%
中耳性疾患	73	-2.2	78	-2.7	93.60%
内耳性疾患	58	-1.8	66	-2.3	87.90%
角膜疾患	35	-1.1	48	-1.6	72.90%
水晶体疾患	17	-0.5	22	-0.8	77.30%
網脈絡膜・視神経系疾患	97	-3	113	-3.9	85.80%
じん臓疾患	169	-5.2	131	-4.5	129.00%
心臓疾患	360	-11.1	293	-10	122.90%
呼吸器疾患	83	-2.6	78	-2.7	106.40%
ぼうこう疾患	26	-0.8	22	-0.8	118.20%
大腸疾患	34	-1	34	-1.2	100.00%
小腸疾患	2	-0.1	1	0	200.00%
その他	393	-12.1	605	-20.6	65.00%
不明	90	-2.8	121	-4.1	74.40%
不詳	741	-22.8	322	-11	230.10%

（　）内は構成比（%）

表 1.5　疾患別にみた身体障害者の状況

以上の厚生労働省の調査からもわかるように，現在，高齢者や障害者が増え肢体不自由者の割合が増えていることから電動車椅子を使用する人々が年々増加すると考えられる．

車椅子や電動車椅子は肢体不自由者にとって有効な移動手段である．利用することにより，行動範囲がひろがり，精神面でも外向的になり明るくなるなどのアンケート調査が得られている．[2]

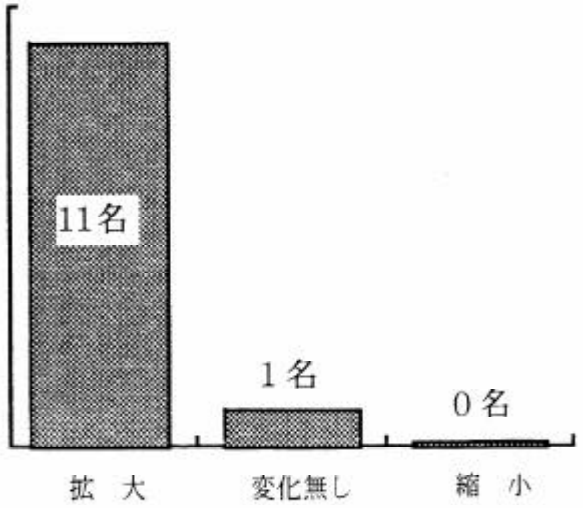


図 1.1　行動範囲の拡大状況

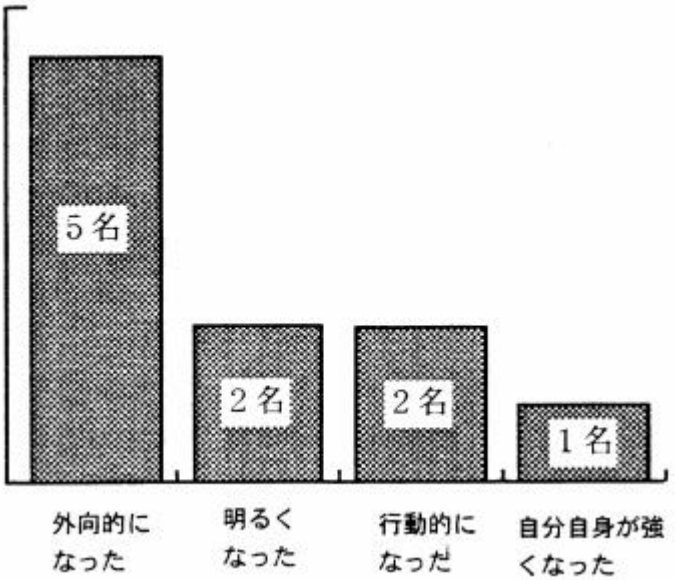


図 1.2　精神面の変化

現在，電動車椅子は身体障害者福祉法により重度身体障害者を対象に給付が行われている．電動車椅子は昭和 54 年より補装具の種目に取り入れられ，昭和 56 年には重度歩行困難者や呼吸器機能・心臓機能障害などにより歩行に著しい制限を受ける者を対象に電動車椅子給付の取り扱いを開始した．現在に至っては利用者のニーズや障害

に合わせた電動車椅子の機種，製品としての改良が進み，デザインや利便性に優れた電動車椅子を頻繁に目にするようになってきた．[3] [4] [5]

しかし，電動車椅子に乗る人は自走用の車椅子に乗る人に比べて，自らの体を動かす機会が少なく，その結果として筋力の低下や心肺系の機能の低下や，床ずれなどの廃用症候群に陥りやすい．さらに，この問題を解決することができる身体的な効用を生み出す構造が付けられた電動車椅子は以前無い．[6]

１．２　本研究の目的

一昨年の夏と冬に高知市帯屋町アーケードを通行または高知県伊野町の伊野町立特別介護老人ホーム「偕楽荘」に入所されている車椅子や電動車椅子を利用している方々を対象に１４名にアンケート調査を行った．回答が得られたのは１１名で後の３名は拒否された．

実際に使用したアンケート用紙を参考資料に添付する．アンケートの概要は
①健康に興味があるか
②健康増進したいとおもうか
③もし車椅子や電動車椅子に健康増進機能が付加されたら利用してみたいと思うか
などの質問を質疑応答形式で調査をおこなった．

この結果質問①に対しては１１名がはいと回答した．また，質問②は１０名がはいと，質問③は１１名がはいと答えた．質問②について車椅子を利用している人と介護をする人から「運動不足になるので絶対に必要」という意見が出されたが，逆に「立とうとする意思が弱くなるので必要ない」という介護者の意見も出された．質問③については「移動手段として使っているので付加する必要がない」という意見も出されたが，多くは「テレビを見ながら家でもできると良い」などの賛成意見が出された．

はい	いいえ
人によっては絶対良い 上半身を固定させる物があればもっと色々な人が利用できる リハビリとして家にあると良い	付加する必要がない（別々にすれば良い） 自分で歩こうとする意思がなくなる恐れがある

表 1.6　質問②，③に対しての意見

このアンケートからもわかるように，ずっと健康でいたい，健康増進したいと考えている人が多い．このことから，電動車椅子に健康増進機能を付加することが必要であると考えた．

一方，欧州などで身体や精神に障害を持つ患者に対して，乗馬療法の有効性が実証されている．乗馬療法は日本においてもここ 10 数年来注目されてきており，屋外で乗馬をする・視線が高くなるといったことで得られる「解放感」や馬の世話をすることによる「生き物との対話」と言った心理的効用と共にバランスの維持や回復・姿勢転換運動・抗重力運動といったことで身体的効果を与え得ると言われている．[7]しかし，正確の穏やかな馬が非常に少ないだけではなく，場所の確保，馬の飼養などで高額な費用を必要とする．そこで，生馬の代わりに乗馬ロボットを用いて，乗馬療法の効果の定量化について研究されている．[8]

乗馬ロボットによる筋電計測実験結果から，体に他動的な揺動を与えることにより，筋力が増加するのではないかという知見が得られた．[9]この結果から，人に他動的な揺れを与えることにより乗車者が健康増進できるような電動車椅子の開発を行った．

本論文では，電動車椅子に座面を揺動させ健康増進させる機能を付加し，その座面の姿勢制御を行った．また電動車椅子に乗ることによって人体にどのような効用がもたらされるかの評価実験について報告する．

１．３　本論文の構成

本節では，本論文の構成，内容について詳細に述べる．第２章では電動車椅子の機構部の説明，第３章には，座面と健康増進機能の円板との関係を知るために，運動方程式を導き出した．この運動方程式を用いて MATLAB によるシミュレーションを行った．第４章は実際に座面姿勢制御をした．第５章はこの電動車椅子に乗ることによって人体にどのような効果が現れるかの評価実験を行ったのでその実験結果について述べた．

第２章
電動車椅子の外観

２．１　健康増進機能

健康増進機能とは，図 2.1 に示すように３つの偏心円板の上に座面を乗せ，その偏心円板をモータで回転させることにより座面を自由に傾斜させる機能である．座面を揺らすことにより乗車者の体に適度な揺動を与え，健康増進を促すことが可能になる．

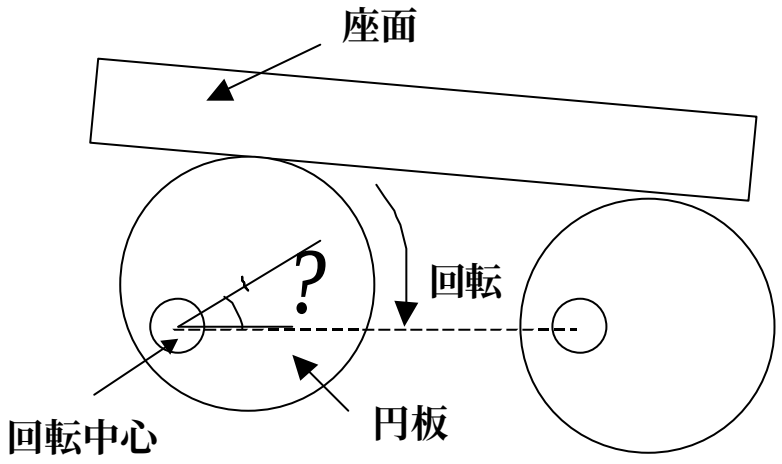


図 2.1　座面と偏心円板の関係

次に電動車椅子の外観，および健康増進機能の機構部の写真を図 2.2，2.3，2.4 に示す．

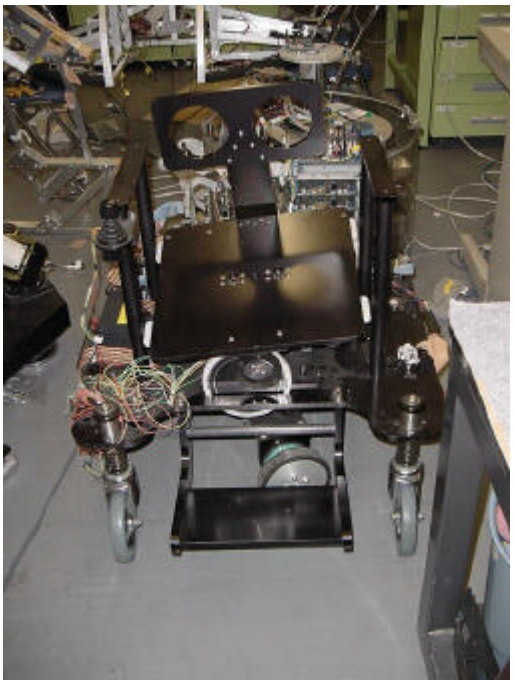


図 2.2　電動車椅子の正面

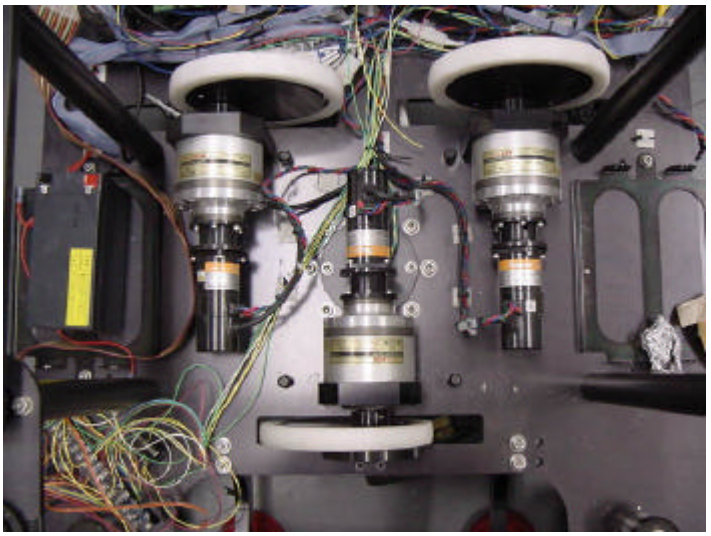


図 2.3　健康増進機能の機構部

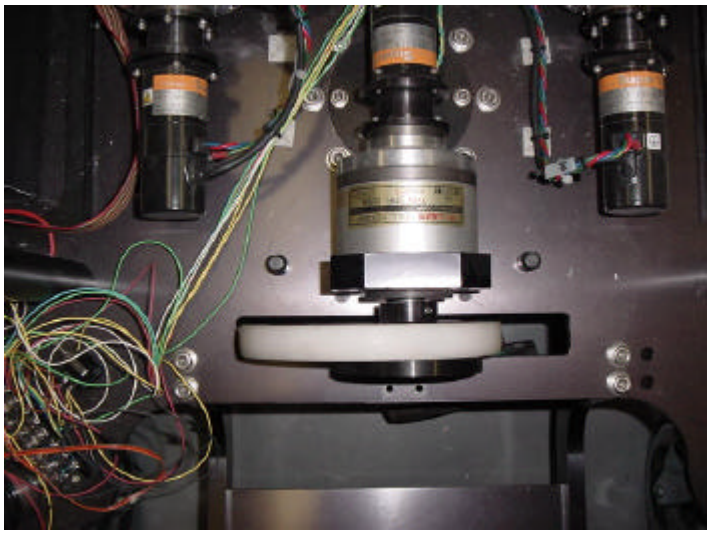


図 2.4　健康増進機能の機構部

この偏心円板には転がり軸受けがつけられている．転がり軸受けの図を図 2.5 に示す．スベリ面軸受けには軸受け面でスベリ運動をしているので，摩擦抵抗が大きい．この面の間に玉やコロをいれて，接触点で転がり運動を行い，スベリ運動のない接触をさせれば摩擦抵抗が小さくなる．こうしたものがコロガリ軸受けであって，軽快に回転することができる．この軸受けは，起動抵抗が小さく，また速度が速くなるにしたがって，抵抗が大きくなっていくというようなことがないのが特長である．[10]

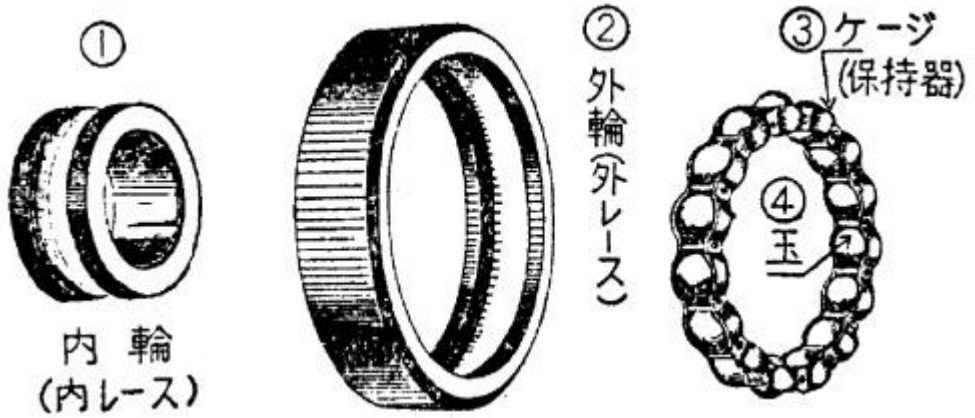


図 2.5　玉軸受け

２．２　円板と他の機械要素との比較

円板という機械要素を用いた最大の理由は他の機械要素に比べた結果，安全性が一番高いと考えたからである．ボールねじ，ダンパ，パンタグラフの４種類の機械要素

を比較，検討してみた．

まず，ボールねじについて考える．工作機械をはじめとして，幅広く用いられているボールねじは，滑りねじと同様な潤滑油の問題に加え，高速駆動時に剛球の循環に伴い発生する振動・騒音や摩擦による発熱の問題を有している．[11]

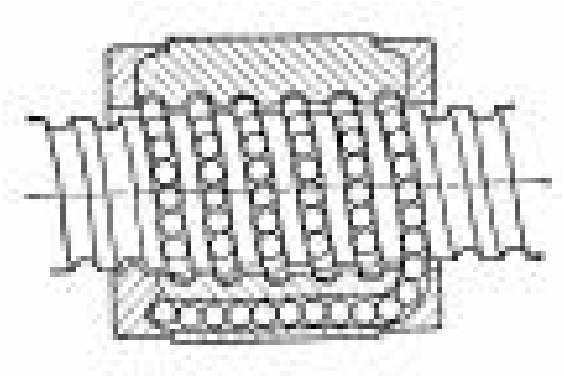


図 2.6　ボールねじ

ダンパについては元来，自動車や電車などの乗り物の振動を防ぐためのものであり，ER 流体を用いたダンパは主として振動制御などに用いられているが, ロボットアームの高精度位置決め精度や空気圧シリンダの速度制御などの位置決め制御，速度制御などにも応用されており，幅広い応用が期待されているが[12 江上]，流体を使うため，使い勝手が悪いと考えられる．

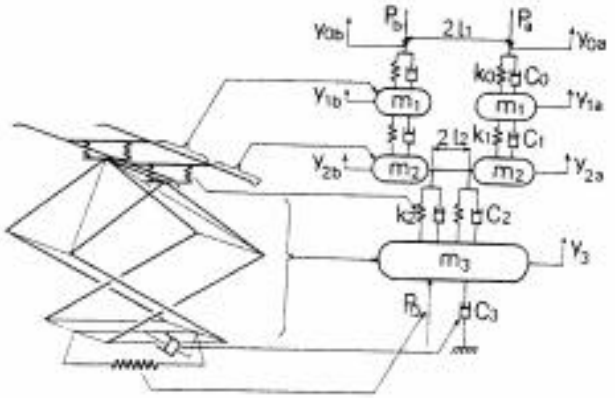


図 2.7　パンタグラフの質点系モデル

パンタグラフのような機構を考えたが，人を乗せることを考えると制御や剛性面で困難と考えた．[13]

多板クラッチは摩擦面数を増加するだけで大動力を簡単に伝達させることができ，また各円板に作用する力が大きいのにもかかわらず変形は小さく小型軽量とすることができるため，トルク伝達の手段として，またブレーキ力を得る手段として多方面に

利用されてきた．[14]

しかし，円板は自動車のクラッチにも使われるように高精度な位置決め制御は困難であると思われるが，丈夫であり，制御のしやすさ，発熱して発火などの危険性が最も少ないと思われる．

上記に述べたように，４つの機械要素を比べた結果表 2.1 のようにまとめることができる．

	位置制御	耐久性	安全性	制御のしやすさ	振動
円板	△	○	○	○	△
ボールねじ	○	○	△	○	△
ダンパ	○	○	△	×	○
パンタグラフ	×	×	×	×	×

表 2.1　　機械要素の比較

これらのことを考慮した結果，安全性を重視し，円板がもっとも適した機械要素と考え，健康増進機能に採用した．

第３章
座面の運動方程式

実際健康増進を行う時に,まず乗り手の状況に合った健康増進処方に基づいて，理想的な座面の姿勢が与えられる.次に逆キネマティクスにより座面の姿勢から偏芯円板に取り付けられた電気モータの回転角度を求める.求められた回転角度をサーボ制御系の目標値として電気モータの回転角度制御を行う.制御アルゴリズムを開発するために,椅子の運動方程式が必要であるのでここでラグランジュの運動方程式に基づいて運動方程式を導出する.

３．１　電動車椅子の座面の方程式

キネマティクスとは運動を扱う学問であって,それを引き起こしている力については考えない．運動学では，位置，速度，加速度，より高次の位置の変数の微分（時間に関してあるいは他の変数に関して）を扱う．したがって，マニピュレータの運動学は，運動の幾何学的性質，時間的性質を扱うことになる．[15]これより図 3.1 のようにロボットアームでは，ロボットアームのジョイント（関節）の変位，速度，加速度が与えられた場合に，アーム先端の位置，速度，加速度を求めることをキネマティクスという．逆キネマティクスとは，ロボットアーム先端の位置，速度，加速度が与えられた場合にアームのジョイントの変位，速度，加速度を求めることをいう[16].

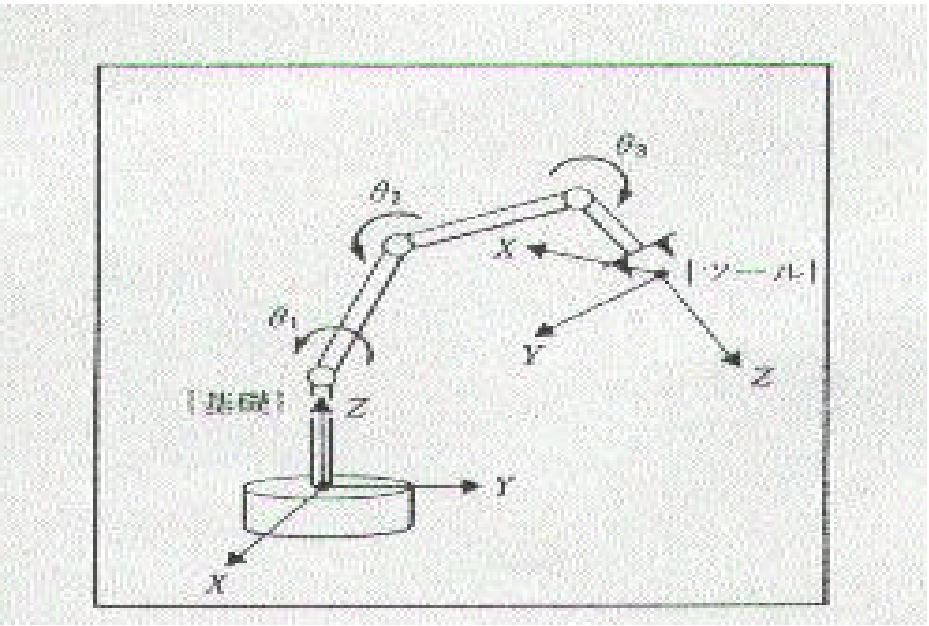


図 3.1　ロボットアーム

本論文では，モータの３つの回転角度 $?_1$，$?_2$，$?_3$ が与えられた場合の座面を表すパラメータ？，？，Z_D を求めることをキネマティクス，そして？，？，Z_D が与えられた場合の３つの回転角度 $?_1$，$?_2$，$?_3$ を求めることを逆キネマティクスとする．

３．１．１　座面の式　$ax \quad ? \quad by \quad ? \quad cz \quad ? \quad d$

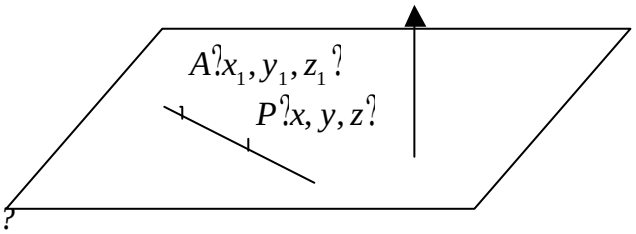


図 3.2　　平面の図

座席の式を考える前に平面の式について述べる[17].

点 $A?x_1, y_1, z_1?$ を通り，ある一定のベクトル $\vec{n}$? $?a,b,c?$ に垂直な平面？の方程式を求める．？上の任意の点を $P?x, y, z?$ とすると

$\overrightarrow{AP}$? ?x ? x_1, y ? y_1, z ? z_1 ?

$\vec{n}$ はこの平面? に含まれるすべてのベクトルと垂直であるから

$$\overrightarrow{AP} ? \vec{n} ? a?x ? x_1 ?? b?y ? y_1 ?? c?z ? z_1 ?? 0 \qquad (3.1)$$

と表せる．P は? 上の任意の点で，その座標がみたす関係式が式(3.1)だから，これが求める平面の方程式である．

一般型は

$$ax ? by ? cz ? d ? 0$$

ただし ?a, b, c?? ?0,0,0?

式(3.1)を展開して定数項を d とおいただけの式である．この式を使い，電動車椅子の座席の運動方程式を導出する．

３．１．２　キネマティクス

図 3.3 は，３つの円板と座席の関係を座標系として示したものである．O_1，O_2，O_3 は３つの円板の中心，A_1，A_2，A_3 はモータの駆動軸と円板との接点，P_1，P_2，P_3 は電動車椅子の座席の座面 M と３つの円板の接点である．O_1，O_2，O_3 は A_1，A_2，A_3 が作る平面に対して垂直であり O_2，O_3 は同一平面上に存在する．座面 M の下には，方向指示のための溝と車椅子の側当てがあるために x，y 方向へは動かない．D は平面 M の中心である．

?$A_1A_2A_3$ は２等辺３角形であり，A_1A_2 ? A_1A_3，B は A_2A_3 の中点 O は ?$A_1A_2A_3$ の中心，A_2A_3 ? $2l_1$，A_1B ? $3l_2$ とおく．O が原点，A_2A_3 は y 軸と平行にし，xyz 座標を置く．

?$_1$，?$_2$，?$_3$ は３つの円板の回転角度である．線分 P_2P_3 は平面 $O_2O_3P_3$ 内にあり，点 P_2，P_3 は平面 M と円 O_2，O_3 との接点であるから，即ち O_2P_2 と O_3P_3 は平行である．平面 M は円 O_1 と緩衝しているため，線 PP_1 は平面 M に存在するので O_1P_1 と PP_1 は直角である．また．円板 O_3 は円板 O_1 と平行にあるので線分 PP_1 と線分 P_3P_2 は平行である．

以上のことより，線 O_1P_1 と線 O_2P_2 と線 O_3P_3 は平行であり，O_1M_1 と O_2M_2 と O_3M_3 は y 軸に平行である．

? m O_1P_1 ? ? $m_2O_2P_2$? ? $m_3O_3P_3$? ? とおく．

よって各点は以下のように座標を与える．円板 $O_1O_2O_3$ の半径を R，A_1O_1，A_2O_2，A_3O_3 を r と置く．

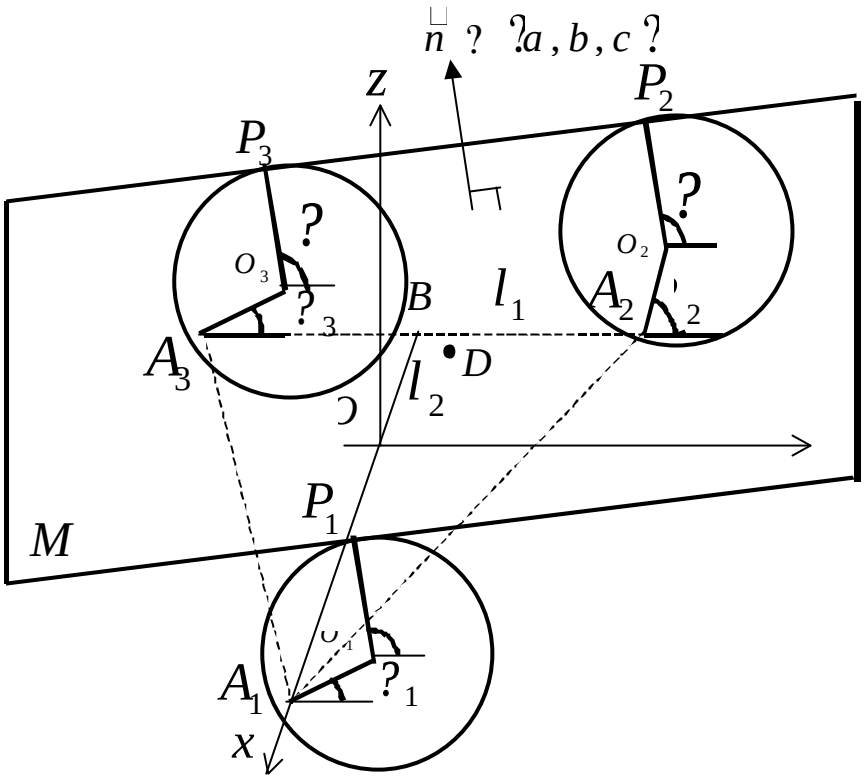


図 3.3　電動車椅子の座面の座標系

モータの　　：　$A_1 ?2 l_2, 0, 0 ?$

$A_2 ?? l_2, l_1, 0 ?$

$A_3 ?? l_2, ? l_1, 0 ?$

円板の中心：　$O_1 ?2 l_2, r \cos ?_1, r \sin ?_1 ?$

$O_2 ?? l_2, l_1 ? r \cos ?_2, r \sin ?_2 ?$

$O_3 ?? l_2, ? l_1 ? r \cos ?_3, r \sin ?_3 ?$

接点：　$P_1 ?2 l_2, r\cos ?_1 ? R\cos ?, r\sin ?_1 ? R\sin ? ?$

$P_2 ?? l_2, l_1 ? r\cos ?_2 ? R\cos ?, r\sin ?_2 ? R\sin ? ?$

$P_3 ?? l_2, ? l_1 ? r\cos ?_3 ? R\cos ?, r\sin ?_3 ? R\sin ? ?$

平面$O_2O_3P_3P_2$とO_3P_3？P_2P_3よりP_2とP_3の座標からP_2P_3の傾きが得られる．

$$\tan ? ? 90^{\circ} ? \frac{r ? \sin ?_3 ? \sin ?_2 ?}{? 2l_1 ? r ? \cos ?_3 ? \cos ?_2 ?} \qquad (3.2)$$

？を0？？？180し？$_2$，？$_3$，l_1，rを与えると，？は唯一の解が得られる．
式(3.2)の分母が0になる場合は

$$\cos ?_3 ? \cos ?_2 ? \frac{2l_1}{r} \qquad (3.3)$$

円板O_2，O_3は緩衝しないように間隔をとっているため，

$$A_2A_3 ? 2l_1 ? 2r ? 2R$$
$$? 4r$$

すなわち

$$\frac{l_1}{r} ? 2 \qquad (3.4)$$

ゆえに式(3.4)がでることにより式(3.3)は成立しない．したがって式(3.2)は解が存在することがわかる．

M平面上に原点は存在しないので平面の方程式を使い，

$$ax ? by ? cz ? 1 \qquad (3.5)$$

とし，P_1，P_2，P_3を式(3.5)に代入すると

$$2al_2 ? b ? r\cos ?_1 ? R\cos ? ? c ? r\sin ?_1 ? R\sin ? ? 1 \qquad (3.6)$$

$$? al_2 ? b ? l_1 ? r\cos ?_2 ? R\cos ? ? c ? r\sin ?_2 ? R\sin ? ? 1 \qquad (3.7)$$

$$? al_2 ? b ? ? l_1 ? r\cos ?_3 ? R\cos ? ? c ? r\sin ?_3 ? R\sin ? ? 1 \qquad (3.8)$$

式(3.6)，(3.7)，(3.8)に？$_1$，？$_2$，？$_3$の値を与えるとa，b，cが得られる．
a，b，cから次に述べる座標変換をし，？，？，Z_Dを求める．

３．１．３　座標変換

？，？，Z_Dを求めるためにまず先に座標変換について述べる．

以下では，回転といえば右手系の回転を指すものとする．また，座標軸に関するベクトルは全部正規化されており，その長さ（ノルム）は１であり，例え

ば，$\|x\| = (x^T x)^{1/2} = 1$となる．本書ではこれを単位ベクトルと呼ぶ．さらに，座標系はすべて正規直交座標系とする．

さて，図 3.4(a)にあるように，ある正規直交座標系 $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$に対して，$\theta_i = 0$のとき $(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$であるべつの正規直交座標系 (x_i, y_i, z_i)があるとしよう．この条件は以下同様とする．

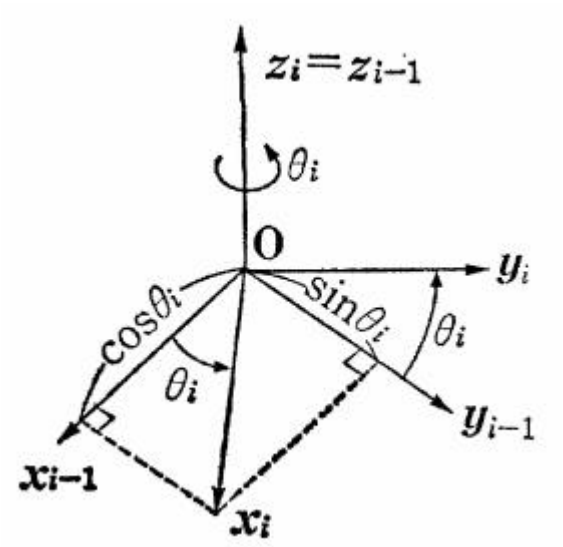


図 3.4(a)　　x 軸回りの回転

まず，(x_i, y_i, z_i)を $z_i = z_{i-1}$軸右手回りに θ_iだけ回転させたとしてみよう．すると，図と$\|x_i\| = 1$より，x_iの x_{i-1}方向成分は $\cos\theta_i$，y_{i-1}方向成分は $\sin\theta_i$，z_{i-1}方向成分は 0 なので

$$x_1 = x_{i-1}\cos\theta_i - y_{i-1}\sin\theta_i - z_{i-1} = 0$$

と表現でき，ベクトルを使って表せば次式を得る．

$$x_i = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) \begin{pmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \\ 0 \end{pmatrix}$$

すなわち，$(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$の座標系からみた x_iが本式で表現されている．同様にして，x_iと右手系をくむ別の単位ベクトル y_i z_i も

$$y_i = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) \begin{pmatrix} -\sin\theta_i \\ \cos\theta_i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$z_i = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

と表せ，まとめると

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) Rot(z, \theta_i)$$

ただし

$$Rot(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

のように記述できる．$Rot(z, \theta_i)$は，$\theta_i = 0$のとき$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$である二つの座標系において，$(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$を$z_i = z_{i-1}$軸回りに$\theta_i$だけ回して$(x_i, y_i, z_i)$を得る回転行列であることがわかる．また，$Rot(z, \theta_i)$は容易にわかるように直交行列（置換行列）であり，$Rot^T = Rot^{-1}$，すなわち$Rot^T Rot = RotRot^T = I_3$を満たしている．

以下では，以上の変換を図 3.4(b)のように$(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$を第$i-1$番目のリンク上に設定された座標系（第$i-1$リンクの姿勢），$(x_i, y_i, z_i)$を第$i$番目のリンク上に設定された座標系（第$i$リンクの姿勢）と考え，アクチュエータが$i-1$番目のリンクに対して第$i$番目のリンクを$z_i$軸回りに$\theta_i$だけ回転させ，第$i$リンクの姿勢が変化したというようにとらえることにする．姿勢（方向）のみであるので二つの座標系の原点の位置は異なっている場合が普通であるので注意したい．

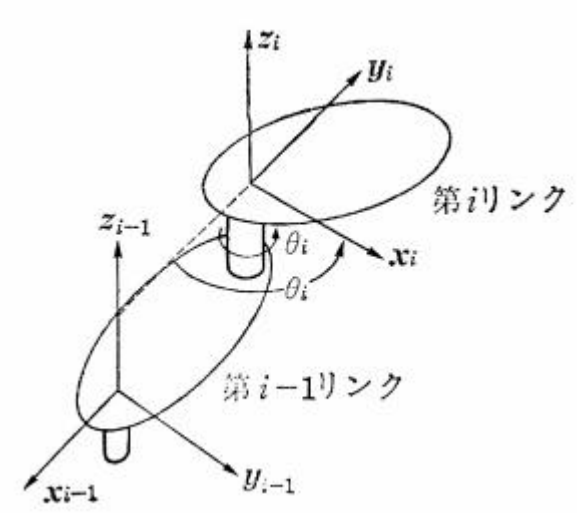


図 3.4(b)　**リンク機構への応用**

つぎに，図 3.4 (c)**のように，**$?x_i,y_i,z_i?$**を** $y_i??y_{i?1}?$**軸回りに**$?_i$**だけ回転させる場合を考える．すると，次式を得る．**

$?x_i,y_i,z_i??x_{i?1},y_{i?1},z_{i?1}?Rot?y,?_i?$

ただし

$$Rot?y,?_i?=\begin{bmatrix} ?\cos? & 0 & \sin? \\ 0 & 1 & 0 \\ ?\sin? & 0 & \cos? \end{bmatrix} \qquad (3.9)$$

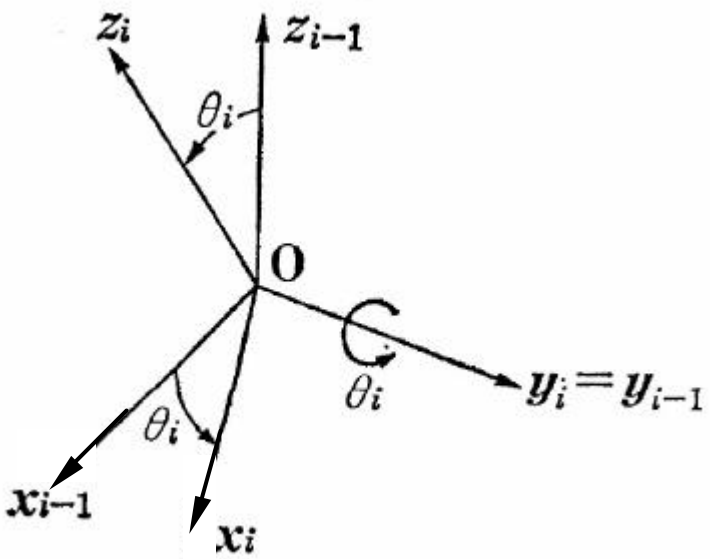


図 3.4(c)　y **軸回りの回転**

同様に，図 3.4 (d)のように，(x_i, y_i, z_i)を x_i (x_{i-1})軸回りに θ_i だけ回転させる場合を考える．すると，次式を得る．

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})\, Rot(x, \theta_i)$$

ただし

$$Rot(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

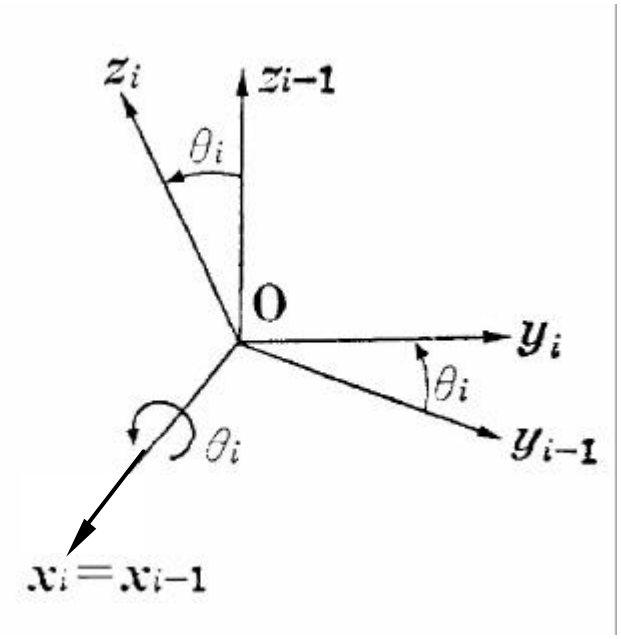


図 3.4 (d)　x 軸回りの回転

これらの座標変換は，一般に回転行列を $A(\theta_i)$ で代表させると

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})\, A(\theta_i)$$

と記述でき，これは第 $i-1$ 座標系から第 i 座標系を見た関係式ともなる．以上で座標変換について説明した．

次に a，b，c から座面の傾きを表す θ，ϕ，z_D を求めるために，座標系を設定する．θ，ϕ，z_D は θ は座面の x 軸まわりの回転角度，ϕ は y 軸まわりの回転角度，z_D は O から座面までの高さを指す．

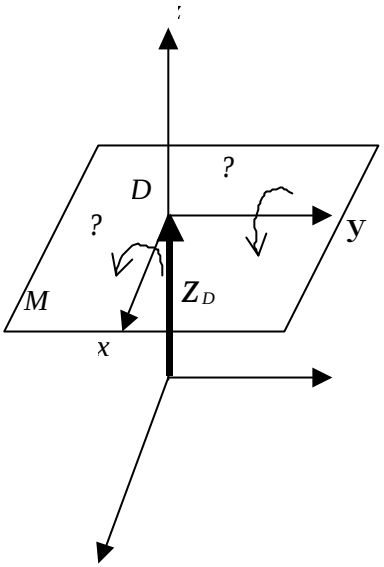


図 3.4　座面の傾きを表すパラメータ

以上から式(3.9)，(3.10)から

$$\begin{bmatrix} ?\cos? & 0 & \sin? \\ ? & 0 & 1 & 0 \\ ?\sin? & 0 & \cos? \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ?1 & 0 & 0 \\ ?0 & \cos? & ?\sin? \\ ?0 & \sin? & \cos? \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ?0 & ?\cos? & \sin? \\ ?0 & ?\sin? & ? \\ ?1 & ?\cos? & \cos? \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

平面 M の法線ベクトルは

$$\vec{n}?ai?bj?ck \tag{3.12}$$

に表すことができるため，式(3.11)，(3.12)より

$$\frac{\cos?\sin?}{a}?\frac{?\sin?}{b}?\frac{\cos?\cos?}{c} \tag{3.13}$$

(3.13)から以下の式(3.14)，(3.15)が得られる．

$$\tan??\frac{a}{c} \tag{3.14}$$

$$\tan???\frac{b}{c}\cos? \tag{3.15}$$

平面 M は z 軸に対して平行にはならないので $c?0$ であることがわかる．

また重心 $D(0,0,Z_D)$ を式(3.5)に代入すると

$$Z_D = \frac{1}{c} \tag{3.16}$$

が得られる．
式(3.14)，(3.15)，(3.16)より θ，ϕ，Z_D が求めることができた．

３．１．４　逆キネマティクス

次に逆キネマティクスについて説明する．θ，ϕ，Z_D から θ_1，θ_2，θ_3 を求める

式(3.14)，(3.15)，(3.16)より

$$a = c\tan\theta$$

$$b = c\tan\phi / \cos\theta$$

$$c = \frac{1}{Z_D}$$

(3.8)-(3.7)より

$$b(2l_1 + r(\cos\theta_3 + \cos\theta_2)) + cr(\sin\theta_3 + \sin\theta_2) = 0$$

即ち，

$$\frac{b}{c} = \frac{r(\sin\theta_3 + \sin\theta_2)}{2l_1 + r(\cos\theta_3 + \cos\theta_2)} \tag{3.17}$$

(3.2)と(3.17)より $\tan(\phi - 90^\circ) = \frac{b}{c}$

$$\phi = 90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{b}{c}\right)$$

ただし $0^\circ \le \phi \le 180^\circ$

(3.6)，(3.7)，(3.8)から

$$b\cos\theta_1 + c\sin\theta_1 = \frac{(1 + al_2 + bR\cos\theta + cR\sin\theta)}{r} \tag{3.18}$$

$$b\cos\theta_2 + c\sin\theta_2 = \frac{(1 + al_2 + bl_1 + bR\cos\theta + cR\sin\theta)}{r} \qquad (3.19)$$

$$b\cos\theta_3 + c\sin\theta_3 = \frac{(1 + al_2 + bl_1 + bR\cos\theta + cR\sin\theta)}{r} \qquad (3.20)$$

式(3.18)，(3.19)，(3.20)より $0^\circ \le \theta_i \le 360^\circ$ の間で，θ_1，θ_2，θ_3はそれぞれ２つの解が得られる．その場合は前に回転した角度に１番近い値をとる．

３．２　ラグランジュ法による運動方程式の導出

座面の動きを知るためにマニピュレータの動力学的な特性を解析する.そのために，座面の運動方程式の導出を行った．運動方程式の誘導方法としてラグランジュ法を用いた.ラグランジュ法は式の導出に力学的エネルギーに関係したラグランジュ関数という概念を用いるため,導出過程が直接的には理解しにくいという難点があるが結果としては物理的な意味の分かりよい簡潔な方程式が得られるので,アームの運動に対する各種力学的にパラメータの影響を解析的に調べるのに適している．[18]

まず，座面の傾きのパラメータθ，ϕ，Z_Dを$q = (q_1 \ \ q_2 \ \ q_3)^T = (\theta \ \ \phi \ \ Z_D)^T$，円板の回転角度を$\Theta = (\theta_1 \ \ \theta_2 \ \ \theta_3)^T$と置く．

次にヤコビアンの定義より，座面のパラメータqと３つの円板の回転角度Θの関係が

$$\dot{q} = J\dot{\Theta}$$

と表せる．

ヤコビ行列とは一般にk次元ベクトル$\Theta = (\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_k)^T$と$l$次元ベクトル

$\Theta = (\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_l)^T$の間に

$$\theta_j = f_j(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_k) \qquad (j = 1, 2, \cdots, l)$$

という関係が成立するとき$k \times l$行列

$$
J_{?}??\,?? \begin{bmatrix} \frac{??_1}{??_1} & \frac{??_1}{??_2} & ?? & \frac{??_1}{??_k} \\ \frac{??_2}{??_1} & \frac{??_2}{??_2} & ?? & \frac{??_2}{??_k} \\ ? & ? & & ? \\ ? & ? & & ? \\ ? & ? & & ? \\ \frac{??_l}{??_1} & \frac{??_l}{??_2} & ?? & \frac{??_l}{??_k} \end{bmatrix} ?\frac{??}{??^{T}}
$$

を，? の? に関するヤコビ行列と呼ぶ．このとき

$$
\dot{?}?J_{?}??\,\dot{??}
$$

が成立する．上式からもわかるように，ヤコビ行列は微係数という概念のベクトル変数の場合への拡張である．このヤコビ行列を用いれば，座面の傾きと円板の回転角度の関係が簡潔に表現できる．すなわち

$$
q?f??\,?
$$

を時間に関して微分することにより

$$
\dot{q}?J??\,\dot{??}
$$

を得る．ここで $J?q?$ は

$$
J?q??\frac{?q}{??^{T}}
$$

によって与えられる．q の ? に関するヤコビ行列である．簡単のためヤコビ行列は以下では J と書くことにする．[19]

次に K は質点系の運動エネルギーであり，P は位置エネルギーである．
円板からの影響は少ないとし，座面に対する影響だけを考慮した場合

$$
K?\frac{1}{2}m_{D}\dot{q}_1^{\,2}?\frac{1}{2}I_{x}\dot{q}_2^{\,2}?\frac{1}{2}I_{y}\dot{q}_3^{\,2}
$$

$$
P?m_{D}gq_{1}
$$

以上の２式が得られる．m_Dは座面の質量，I_xとI_yは慣性モーメントを表す．ラグランジュ関数$L?K?P$より

$$f_i \begin{matrix} ?f_1? \\ ?f_2? \\ ?f_3? \end{matrix} \begin{matrix} ?m_D q_1? \\ I_x q_2 \\ I_y q_3 \end{matrix} \begin{matrix} ?m_D g? \\ ?m_D g? \\ ?m_D g? \end{matrix} \begin{matrix} 0 & 0 \\ I_x & 0 \\ 0 & I_y \end{matrix} \begin{matrix} ?q_1? \\ ?q_2? \\ ?q_3? \end{matrix} \begin{matrix} ?m_D g? \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \qquad (3.20)$$

が求まり，座面の運動方程式が求められた．

３．３　シミュレーション

式(3.20)のとおり，ラグランジュの運動方程式が求められた．この式を用い，シミュレーションにより解析を行った．

３．３．１　仮想仕事の原理

座面に対する力を円板を回転させるための力すなわちトルクにかえる必要がある．

ハンドを正確に力が機構に働いて，機構が移動すれば，仕事（工学的な意味で）がなされたことになる．仕事は力とその働いた距離で定義され，エネルギーの単位を持つスカラである．仮想仕事の原理から，この移動量を無限小にすることによって，静的な場合の正確な式を導くことができる，仕事はエネルギーの単位を持っているので，どの一般座標で表現しても同じであり，ここでは特に，デカルト空間でなされた仕事と関節空間での仕事を等しいとおく．多次元の場合，仕事は，力あるいはトルクのベクトルと，変位のベクトルの内積になる．つまり，

$$F?x??? \qquad (3.21)$$

ここでFはデカルト空間で表した手先効果器に働く 6×1 力－モーメントーベクトルで，$?x$は 6×1 微小変位ベクトル，$?$は 6×1 関節トルク，そして$??$は 6×1 微小関節変位ベクトルである．式(3.21)はつぎのようにも書ける．

$$F^T ?x??^T ??$$

ヤコビアンの定義より

$?x?J??$

であるから

$F^T J?? ??^T??$

となる．これはすべての?? で成立するから

$F^T J??^T$

両辺の転置をとって，

$??J^T F$

となる．[20]円板が行う仕事を

$W??^T???? _1?? _1?? _2?? _2?? _3?? _3$

座面がする仕事を

$W? f^T ?q? f_1 ?q_1 ? f_2 ?q_2 ? f_3 ?q_3$

と表せる．これらから

$?^T??? f^T J??$

が求められ

$??J^T f$

がわかる．式(3.20)を代入し，

$$??J^T \begin{bmatrix} m_D & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ?q_1 \\ ?q_2 \\ ?q_3 \end{bmatrix} ? \begin{bmatrix} m_D g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

が求められる．

３．３．２　ＰＩＤ制御

ＰＩＤ制御（PID control）とは元々はプロセス制御の用語であり，図６－２の調節部がＰ動作（比例動作，proportional action），Ｉ動作（積分動作，integral action），Ｄ動作（微分動作，derivative action）の３つの制御動作から構成されている場合にこれをＰＩＤ制御系と呼ぶ.これらの動作は必ずしも３つあわせて用いられるとは限らず，場合によってはＰ制御，ＰＩ制御，ＰＤ制御なども用いられる

これらの制御動作について水槽の水位制御を例に取り説明しよう.図 3.5 のような水槽があって目標水位まで注水する比例制御を考える.

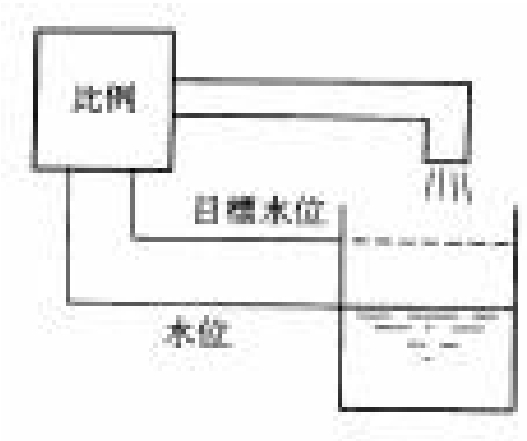


図 3.5　比例水位制御

この制御は最初は注水量が多く,だんだん誤差が少なくなってくればそれにつれて注水量も少なくなり,目標水位に一致したとき注水量が零となるような制御であり，我々が日常行う動作と同じものとなる．次に図　のようにこの水槽に排出口がついている場合を考える.

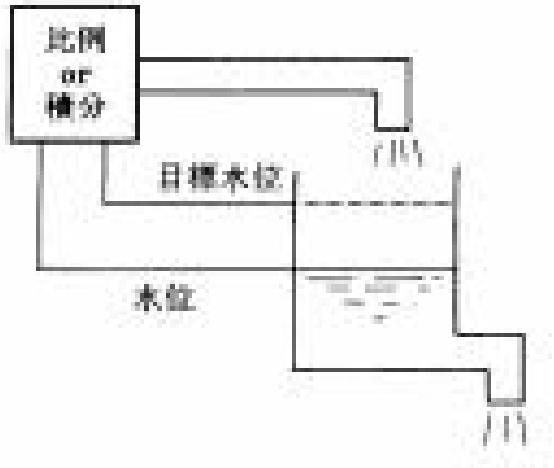


図 3.6　排出口のある水槽の水位制御

この場合比例制御を用いた場合

水位一定　→　定常的排水　→　定常的注水が必要　→　注水量に比例した定常偏差が必要

となって水位一定の場合には定常偏差が生じてしまう.そこで積分制御を用いることを考える．この場合には

水位一定　→　定常的排水　→　定常的注水が必要　→　偏差（積分器の入力）は零が必要

となって定常偏差を生じないことになる.微分動作は誤差の微分に比例した動作であり，誤差に何の変化も生じなければ零となる．そして誤差が増えていけば，正となり制御動作を強める．また誤差が減少していれば，負となって制御動作を緩和する．すなわち，誤差の変化を見て，未来の誤差を先読みした制御動作であるといえる．そして，単独では用いられず，補助動作として他の動作と一緒に用いられてブースターとして制御動作を改善する働きをする.すなわち, 図 3.5 や図 3.6 の水位制御において比例制御や積分制御とともに用いた場合，最初に目標水位が与えられた瞬間は急激に注水し，逆に目標水位に近づくと注水量を抑えるような動作をする.

ここでは,DC モータを例として PID 制御系の性質について前に述べたフィードバック制御系の性質と関連づけながら述べることにする．DC モータの位置制御系においては制御対象のなかに積分動作を含むが速度制御系においては含まないなどの速度制御系と位置制御において性質が異なるため, ここではこれらを分けて論じることにする．[21]

３．３．３　シミュレーション結果

この式(3.21)を基にシミュレーションを行った. シミュレーションソフトＭＡＴＬＡＢ[22]を使用し，解析を行った.

しかしＰＩＤ制御を行ったところ図 3.7，3.8 のように定常誤差生じ，目標値に追従することができなかった.

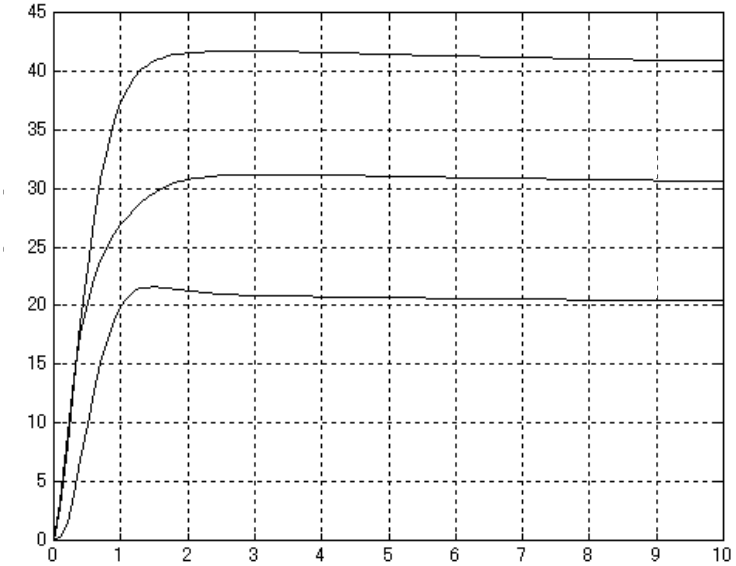


図 3.7　$?_1$，$?_2$，$?_3$を各 20 度，30 度，40 度に目標値に設定した場合

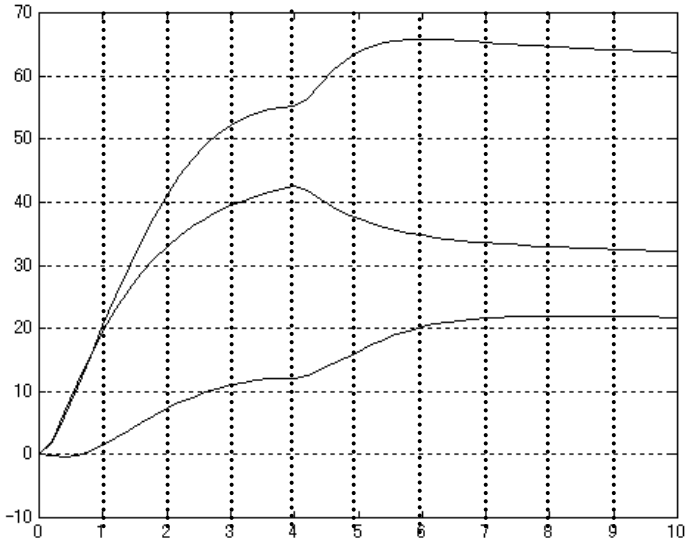


図 3.8　$?_1$，$?_2$，$?_3$を各 10 度，40 度，60 度に回転させた後，
各 20 度，30 度，60 度に目標値に設定した場合

目標値に追従させるよう，状態フィードバック制御を行った．状態フィードバック制御について最初に述べる.制御量に影響するであろう内部情報に着目して制御しようという考え方がある．内部除法を表す変数を状態変数（state variable）と呼び，それら制御量に影響する内部変数を（出力フィードバック

と併用して)フィードバックして制御に有効に利用するものを状態変数フィードバック制御系(state variable feedback control system)あるいは状態フィードバック制御系(state feedback control system)と呼ぶ．図 3.9 に一般的な状態フィードバック制御系構成図を示す．

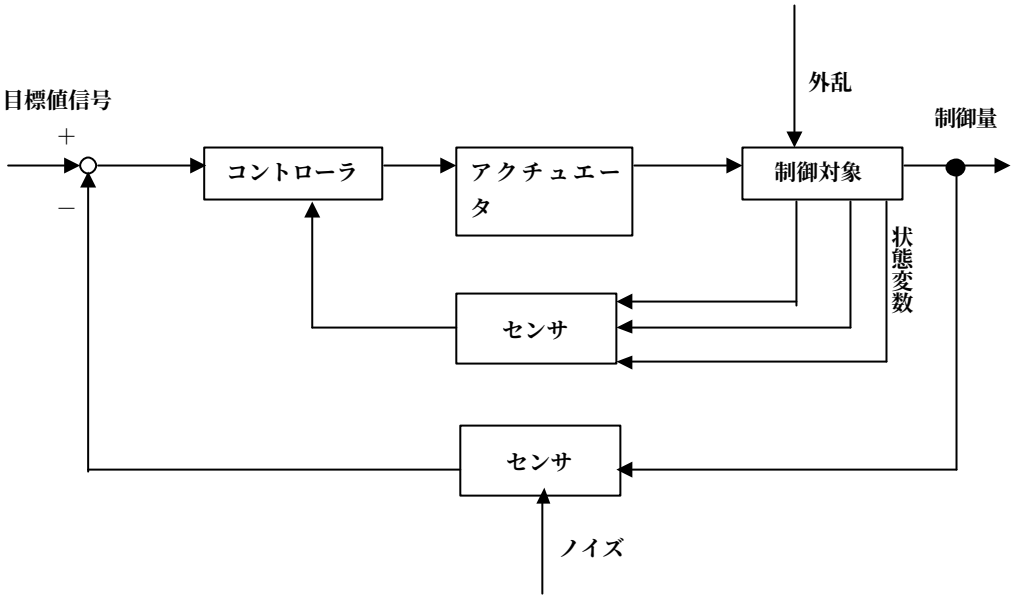


図 3.9　状態フィードバック制御系

状態フィードバック制御系を倒立振子を例に説明すると，制御量 $?$ が 0 であっても，$d?/dt$ が値をもっていれば，直後から必ずや $?$ は値をもち始め，振子は倒れる方向に動き出す．倒れ始めると修正動作が働き元に戻す努力がなされる．つまり $d?/dt$ の値も利用して制御するのがより適切な制御であると考えられる．事実，図 3.10 のように $d?/dt$ の値の情報を利用するような制御系を構成すると，同図に示すようにぴたりと倒立振子は静止する．このように制御量以外の状態変数を利用することの意味がわかる．これが状態フィードバック制御系という．[23]

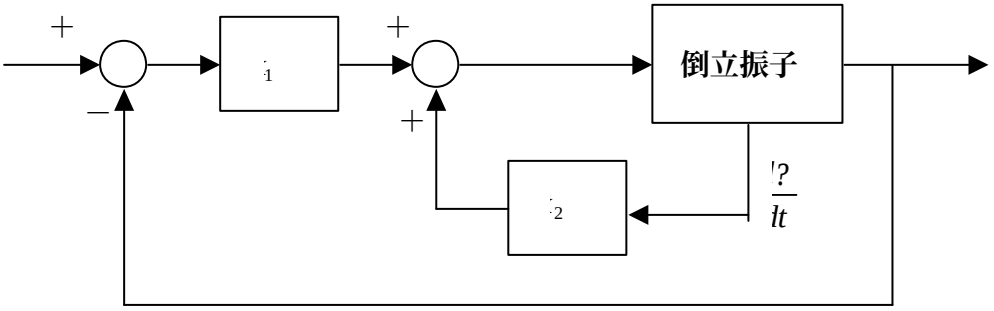


図 3.10　倒立振子（状態 FB 系制御系）

この状態フィードバック制御を用いたところ，以下の図 3.11，3.12 のようにシミュレーションは目標値に追従することができた.

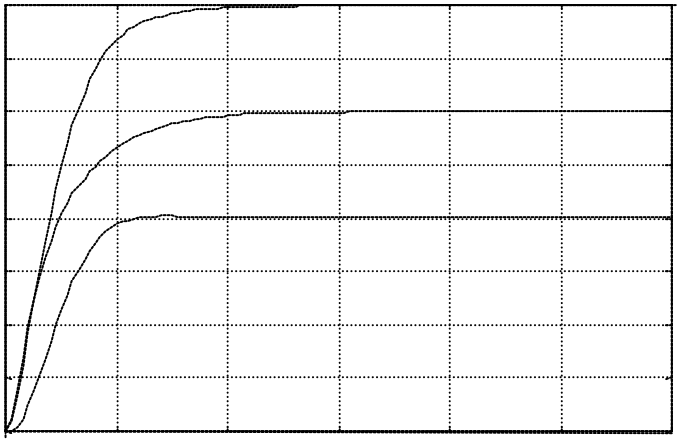


図 3.11　$?_1$，$?_2$，$?_3$を各 20 度，30 度，40 度に目標値に設定した場合

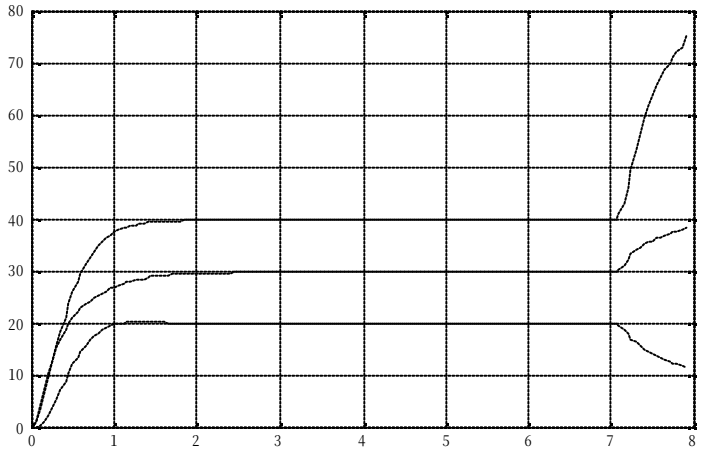


図 3.12　$?_1$，$?_2$，$?_3$を各 20 度，30 度，40 度に回転させた後，
各 10 度，40 度，70 度に目標値に設定した場合

第４章
座面姿勢制御

４．１　システム構成

図 4.1 に座面を制御するためのシステム構成図を示す.

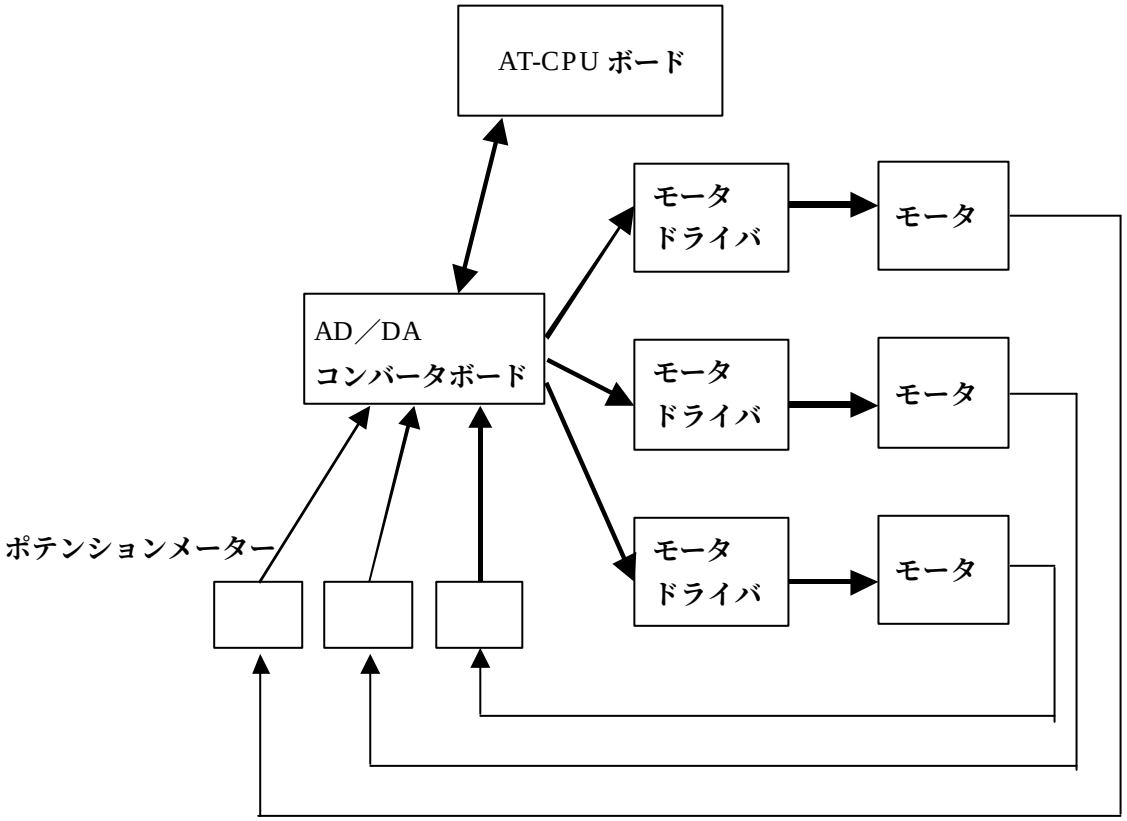


図 4.1　システム構成図

４．２　制御実験

４．２．１　ディジタル変換

最近，マイクロエレクトロニクスの急速な進歩に伴って，制御においてもコントローラとしてディジタルコンピューターを用いたディジタル制御が多く用いられるようになってきており，今後ますますその傾向は強まると思われる．従来のアナログ制御によれば制御装置の部分はハードウエアによって構成する必要があるが，ディジタル制御の場合にはソフトウエアによってそれを構成するため，古典制御理論に基づく制御則にしろ現代制御理論に基づくような複雑な制御則にしろ容易に実現できることになる．

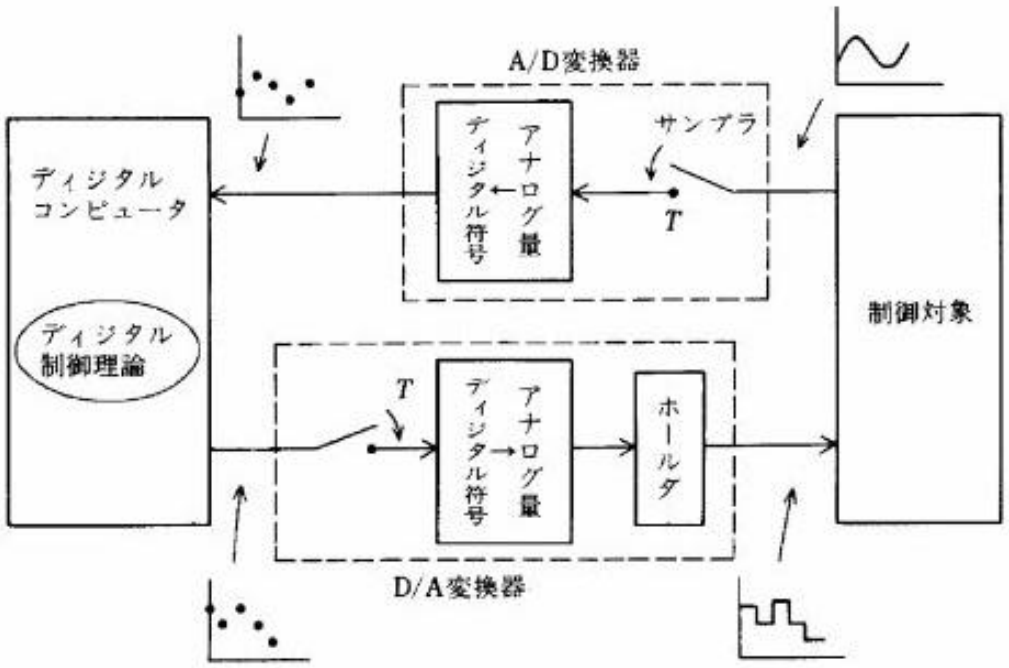


図 4.2　ディジタル制御系の概念図

ディジタル制御系（digital control system）の実際的な構成を図 4.2 に示す．制御対象はほとんどすべての場合アナログの連続信号で表される．これに対してディジタルコンピューターは信号を離散的にしか扱えない．したがって，制御対象とコントローラの間で信号をアナログ量からディジタル量へおよびディジタル量からアナログ量へ変換する装置が必要となる．これらが A／D 変換器および D／A 変換器である．A／D 変換器一定時間間隔（サンプリング周期）ごとに連続な信号を離散時間信号に変換し（サンプラ），量子化（アナログ量に最も近いディジタル量を割り当てること，例

えば，1V ごとの分解能の場合 2.1V に 2V を割り当て，3.7V に 4V を割り当てるなど）して符号化（値を２進法などで表すこと）し，アナログ量をディジタル符号に変換する．一方，D／A 変換器はサンプリング周期（sampling period）ごとにディジタル符号で与えられる信号をアナログ量に戻し，次の信号が入るまでこれを保持（零次ホールド）する．[24]

制御を行うために，アナログ量をディジタルに変換する Z 変換について説明する．

アナログ信号 $x(t)$ を一定時間 T （サンプリング周期）ごとにサンプリングすると $x(0)$，$x(T)$，$x(2T)$，・・・のサンプル値が生じる．これらのサンプル値列 $\{x(kT)\}$ は図 4.3 に示すようなパルス列で表されたものとする．このとき出力 $x^*(t)$ は式(4.1)のように信号 $x(t)$ に単位インパルス関数を乗じた信号の和に等しくなる．

$$x^*(t) = x(0)\delta(t) + x(T)\delta(t-T) + \cdots + x(kT)\delta(t-kT) + \cdots = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)\delta(t-kT) \tag{4.1}$$

式(4.1)のラプラス変換は単位インパルス関数のラプラス変換の結果を応用すると容易に行え，式(4.2)のようになる．ただし，$x(kT)$ を T を省略して $x(k)$ と表している．

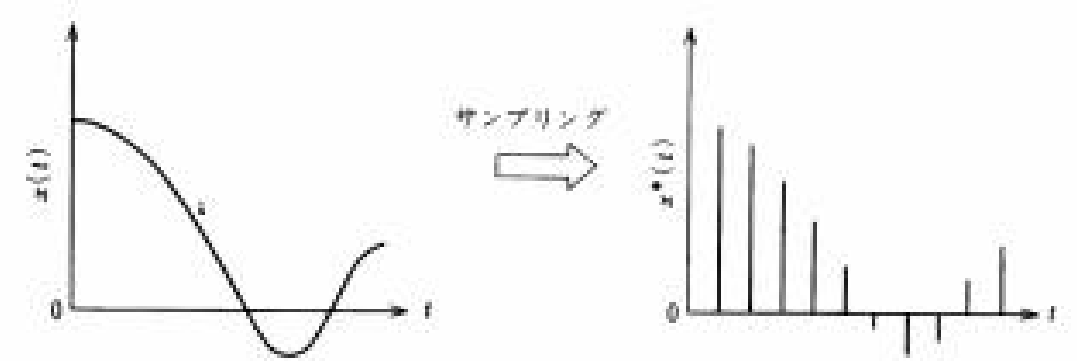


図４.３　サンプリング

$$X^*(s) = L[x^*(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)e^{-kTs} \tag{4.2}$$

ここで

$$z = e^{sT} \tag{4.3}$$

と置いたものを $x(t)$ の z 変換(z-transformation) $X(z)$ といい次のように表わす．

$$X(z) = z[x^*(t)] = Z[X^*(s)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k} \tag{4.4}$$

なお，{ }は $x(t)$，$x(k)$，$X(s)$ などと表されることもある．

いま，１サンプリングだけ時間を進ませて現在値を $x(k+1)$ とするパルス列 $\{x(k+1)\}$

の z 変換を考えると

$$z\{x(k+1)\} = \sum_{k=1}^{\infty} x(k) z^{-(k+1)} = z \sum_{k=1}^{\infty} x(k) z^{-k} = zx(0) + zz\{x(k)\} = zx(0) \qquad (4.5)$$

となる．

以上より目標値に対しての現在の円板の角度との誤差を $e(t)$，目標値に追従させるための操作量を $u(t)$ とすると式(4.6)のように表すことができる．

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (4.6)$$

式(4.6)を z 変換すると

$$U(z) = u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{i=0}^{k} e(i) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \qquad (4.7)$$

のようになる．1 サンプリングだけ時間を進ませたとすると

$$U(z-1) = u(k-1) = k_p e(k-1) + k_i T \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + k_d \frac{e(k-1) - e(k)}{T} \qquad (4.8)$$

で表され式(4.8)から式(4.7)を引き

$$u(k-1) - u(k) = k_p - e(k) + k_i T e(k-1) - \frac{k_d}{T} - e(k) - e(k-1) \qquad (4.9)$$

が得られた．[25]

C 言語を用いて座面を動かす制御プログラムを作成した．そのプログラムは以下である．

$$Lrot = L_{k_p} * (L_{ek} - L_{ek}old) + L_{k_i} * L_{ek}$$

$Lrot$ ：出力電圧，L_{ek} ：現在の誤差，$L_{ek}old$ ：以前の誤差

$$u(k) = u(k-1) + k_p - e(k) + k_i - e(k) + k_d \frac{-e(k) - e(k-1)}{T}$$

４．２．２　制御ブロック線図

PID 制御器を DC モータに応用したが，実際には DC モータ制御系においてはほとんどの場合電流マイナーループを用いた制御系（多重閉ループ制御系（multi closed loop control system））が構成され，その中に PID 制御が用いられている．

DC モータの電気的時定数 τ_e の影響を打ち消すために図 4.4 のような電気マイナーループを付加して電流制御系を構成する方法がよく用いられている．

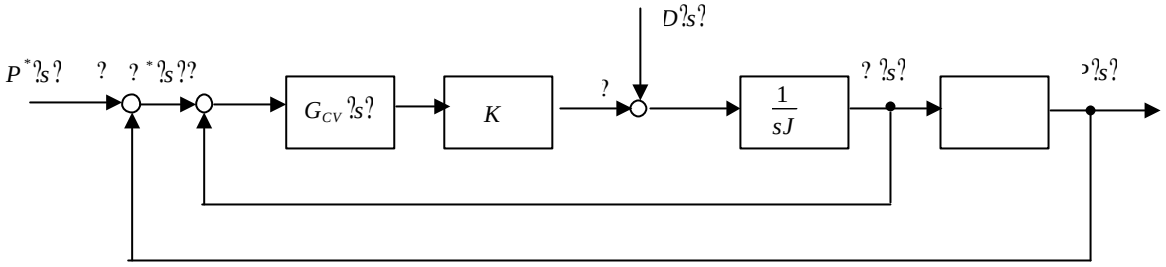


図 4.4　制御のブロック線図

このようにまず電流マイナーループを構成して，その外側に速度マイナーループ，位置ループというように多重ループの構造を構成し，そのなかに PID 補償器をハードウエアあるいはソフトウエアで構成するのが実際によく用いられる DC サーボコントローラである．[26]モータの駆動制御実験を行った．

４．２．３　P 制御

円板の位置制御を行うため，3 章でシミュレーションを行った PID 制御を行った．

まず最初に P 制御を行い，次に PI 制御，PID 制御を行った．実験では円板を１，２，３と番号を付けそれぞれ３0 度，60 度，90 度に回転させるように目標値を設定した．

下の図 4.5，4.6，4.7 に示したように*Kp* の値を変えても，約５度から 10 度の誤差が生じ，目標値に追従することが不可能であった．

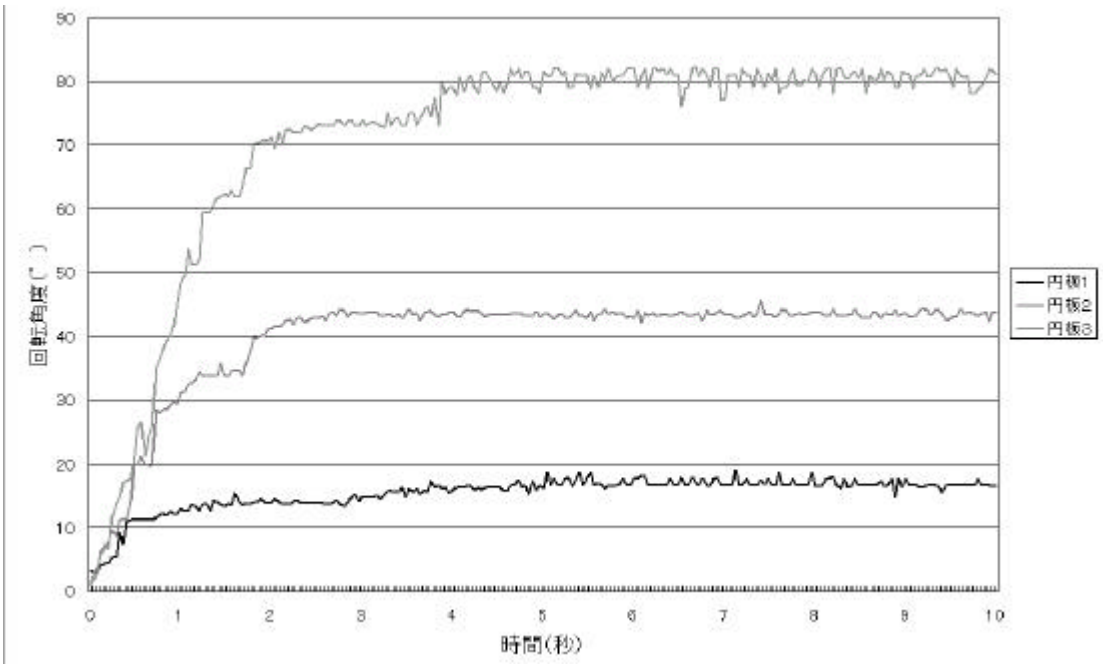


図 4.5　*Kp* =0.05 の場合

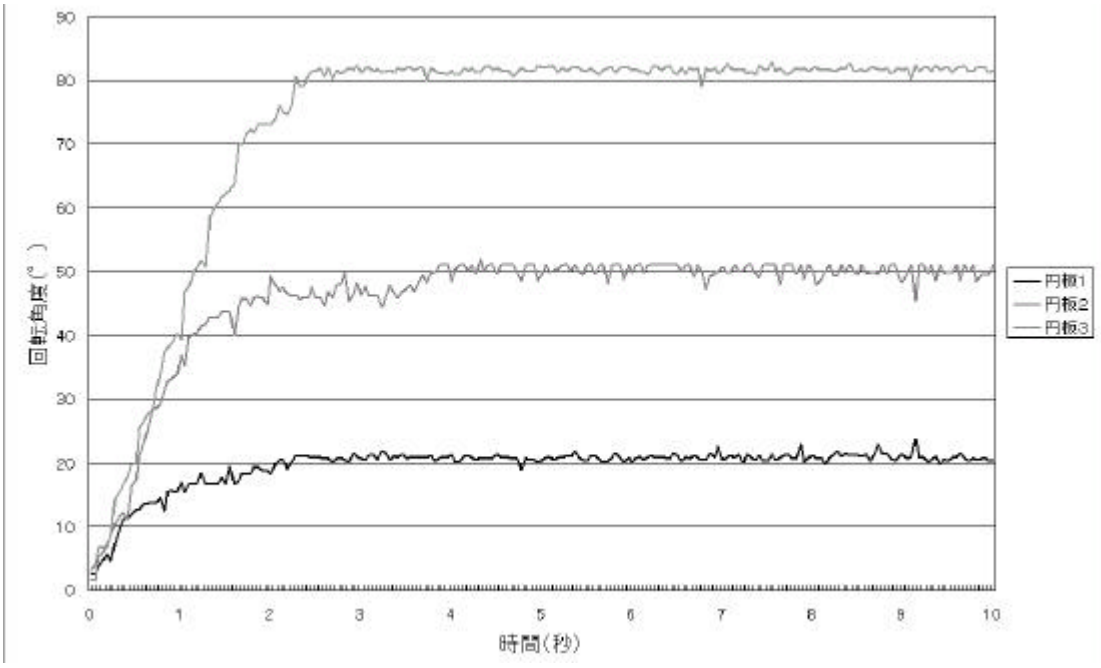


図 4.6　Kp =0.07 の場合

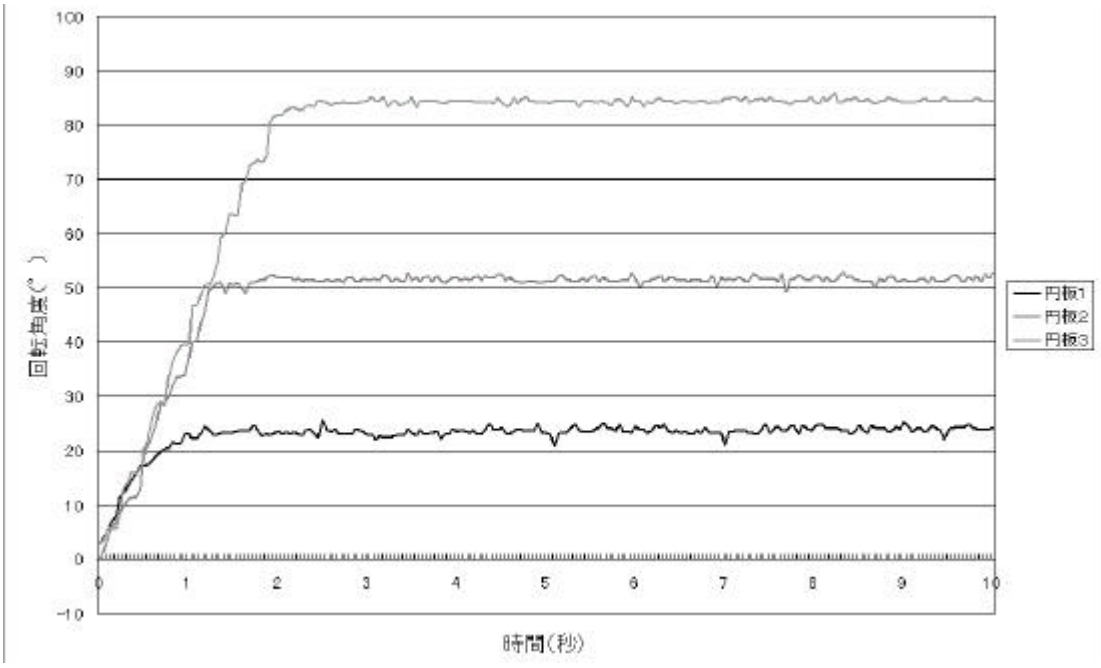


図 4.7　Kp =0.１の場合

４．２．４　PI 制御

次に PI 制御を行った．Kp，Ki の値を調整すると図 4.8，図 4.9 のように徐々に目標値に追従し，図 4.10 では目標値に追従することができた．

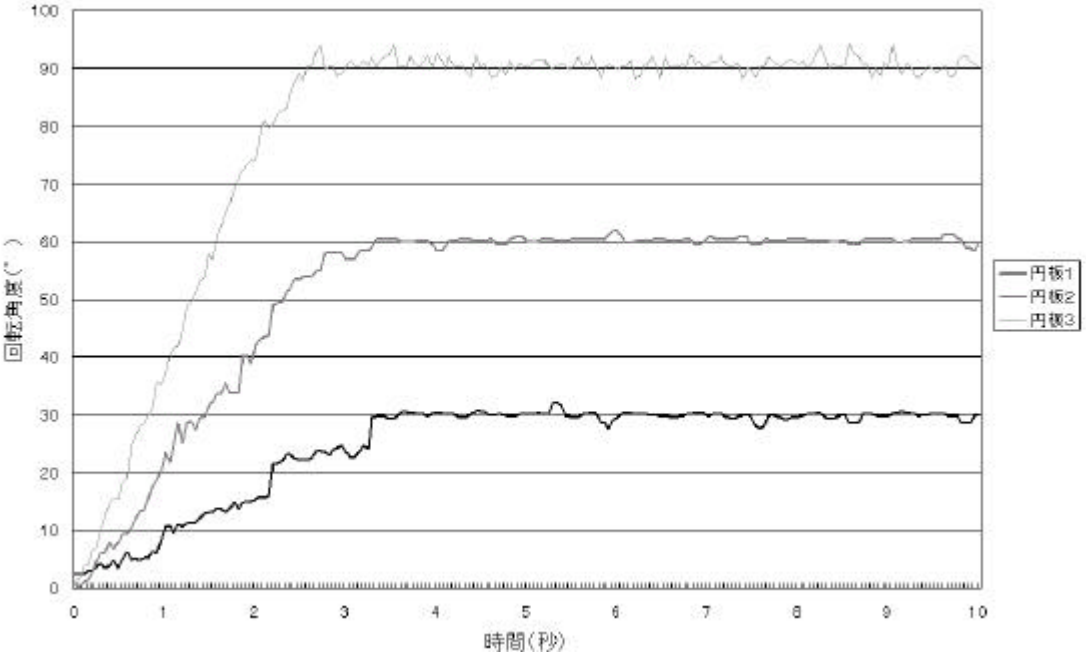


図 4.8　Kp =0.03　Ki =0.0002 の場合

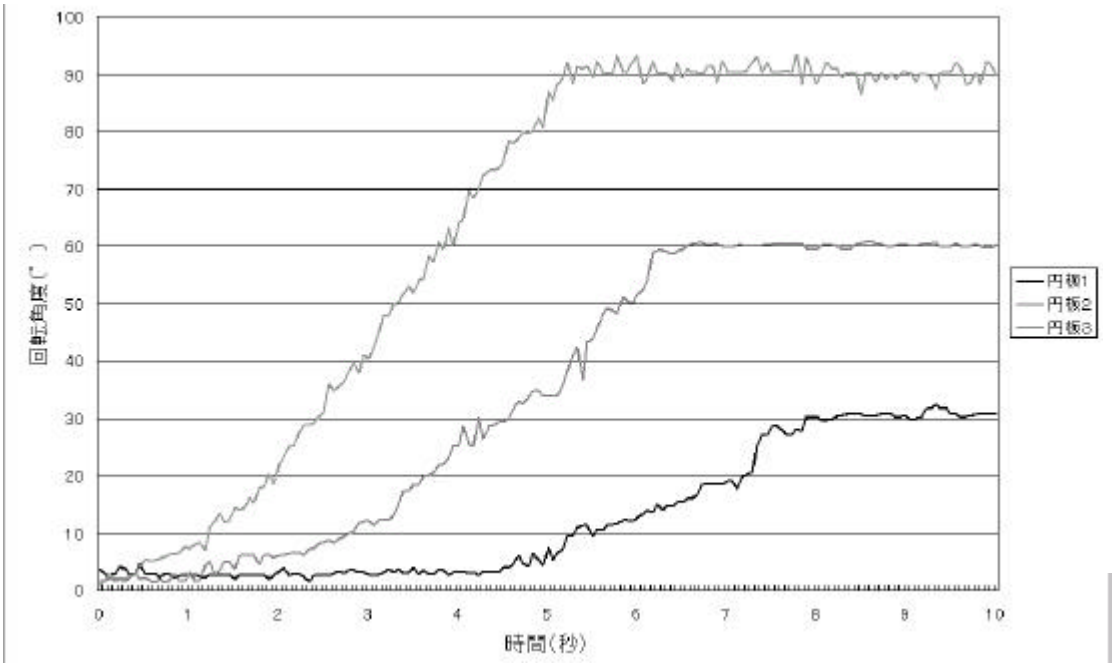


図 4.9　Kp =0.009　Ki =0.0001 の場合

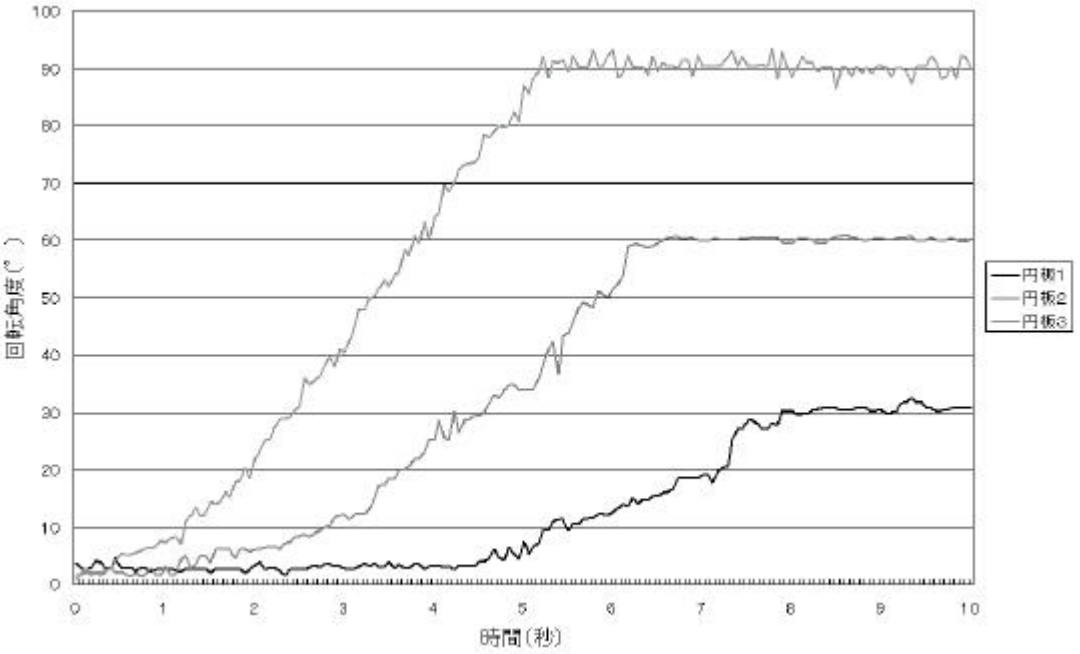


図 4.10　Kp =0.01　Ki =0.0001 の場合

４．２．５　まとめ

実験の結果, MATLAB によるシミュレーションのように状態変数フィードバック制御を行わなくても PI 制御で制御できることがわかった.

これは以下より示される．まず最初に基本となる全状態フィードバック制御系について述べる.

制御対象

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k)$$

$$y(k) = Cx(k) \qquad (4.10)$$

誤差信号

$$e(k) = R(k) - y(k) \qquad (4.11)$$

ただし，$x(k)$：状態変数(n×１)，$y(k)$：出力変数（m×１），$u(k)$：入力変数（r×１），$R(k)$：目標値信号（m×１），$d(k)$：外乱（q×１），A：n×n，B：n×r，C：m×n，E：n×q

式(4.10)の系は可制御・可観測であるとし $r \geq m$ とする.

誤差信号 $e(k)$ の一階差分値は次のように求まる.

$$\Delta e(k+1) = \Delta R(k+1) - C\Delta x(k+1) = \Delta R(k+1) - CA\Delta x(k) - CB\Delta u(k) - CE\Delta d(k)$$

ただし，Δ は一階後退差分オペレータであり，例えば

$$\Delta e(k+1) = e(k+1) - e(k)$$

である．同様に $x(k)$ の一階差分値も次のようになる．

$$\Delta x(k+1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k) + E\Delta d(k)$$

上の 2 式は次式にまとめられる．

$$\begin{bmatrix} \Delta e(k+1) \\ \Delta x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix} \Delta R(k+1) + \begin{bmatrix} -CE \\ E \end{bmatrix} \Delta d(k) \quad (4.12)$$

または

$$X_0(k+1) = X_0(k) + G\Delta u(k) + G_R\Delta R(k+1) + G_d\Delta d(k) \quad (4.13)$$

上式は誤差信号と状態変数の一階差分値を新たな状態変数とし，入力変数の一階差分値を新たな入力変数とする拡大系であり，これを誤差信号のダイナミックスを表すという意味でエラーシステム（error system）と呼ぶことにする．ここで目標値信号 $R(k)$ と外乱信号 $d(k)$ がステップ信号または一定値をとることとすると，それらの値の変化する時刻以外では $\Delta R(k+1) = 0$，$\Delta d(k) = 0$ であるので式(4.13)式は次式となる．

$$X_0(k+1) = X_0(k) + G\Delta u(k)$$

$$e(k) = C_0 X_0(k) \quad (4.14)$$

式(4.14)において適切な制御入力 $\Delta u(k)$ を加えることにより閉ループ系を安定に制御できれば，$k \to \infty$ で $X_0(k) \to 0$ つまり $e(k) \to 0$ とできる．しかも制御対象のパラメータ変動があっても，閉ループ系の安定性が保たれる範囲のパラメータ変動であるならば定常誤差を零とすることが保証される．また $R(k)$ と $d(k)$ がステップ状に変化する前後の時刻では $\Delta R(k+1)$ と $\Delta d(k)$ は値をもつので，その情報を利用して制御性能を向上させるためのフィードフォワード制御が考慮される．式(4.14)の可制御性・可観測性は次のようになる．原系が可制御であり Z=1 に零点がないときエラーシステムは可制御であり，原系が可観測であり A が正則ならばエラーシステムは可観測である．なお，連続時間系を離散化した場合には A は正則である．また A が正則でない場合は可観測ではないが可検出である．

式(4.14)のエラーシステムを安定に制御することによって定常ロバスト性が保証されるが，そのような制御入力をもとめるために最適レギュレータ理論を用いる．もちろん状態フィードバックによる制御系構成であるから他のほうほうによっても入力は決定できるわけであるが，今回は最適レギュレータ理論のみを用いて以下の議論をする．つぎの評価関数を定義する．

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \left(X_0^T(k) Q X_0(k) + u^T(k) H u(k) \right) \qquad (4.15)$$

ただし，Q：半正定対称（m＋n）×（m＋n），H：正定 r × r

最適制御入力は次のように求められる．

$$u(k) = F_0 X_0(k) = \begin{bmatrix} F_e & F_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ x(k) \end{bmatrix} = F_e e(k) + F_x x(k) \qquad (4.16)$$

ここで

$$F_0 = \left(H + G^T P G \right)^{-1} G^T P \qquad (4.17)$$

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G \left(H + G^T P G \right)^{-1} G^T P \Phi \qquad (4.18)$$

式(4.16)の制御入力はエラーシステムの全状態フィードバック制御となっており，これをエラーシステム式(4.14)に印加して次の閉ループ系が得られる．

$$X_0(k+1) = \left(\Phi - G F_0 \right) X_0(k) \qquad (4.19)$$

式(4.19)の閉ループ系が安定であることは Lyapunov の安定定理を用いて示される．式(4.16)を $u(k)$ について解いて式(4.20)を得る．

$$u(k) = F_e \sum_{i=1}^{k} e(i) + F_x x(k) = F_x x(0) + u(0) \qquad (4.20)$$

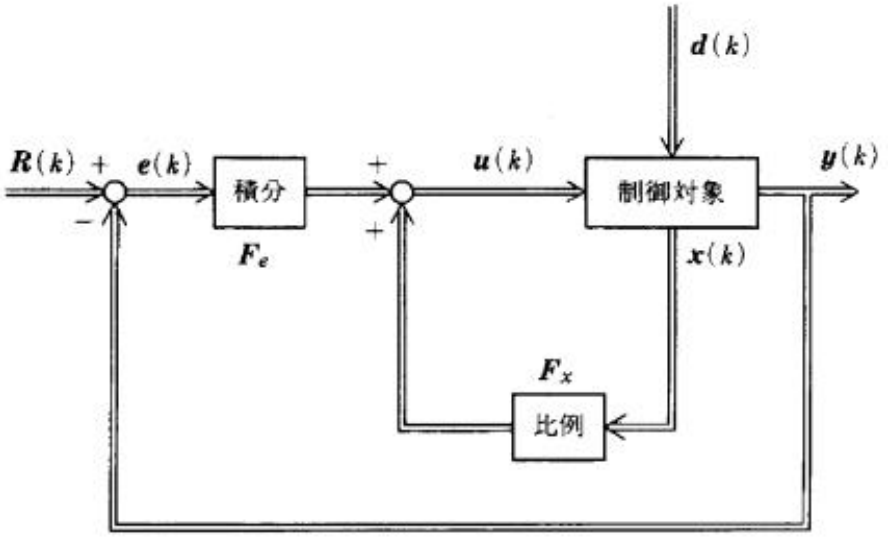


図 4.11　最適 1 型サーボ系構成図（全状態フィードバック）

式(4.20)により最適 1 型ディジタルサーボ系は図 4.11 のようになることがわかる．ただし，そこでは $x(0)$ と $u(0)$ は示していない．式(4.20)における $u(0)$ は任意に決定で

きるパラメータであり，これをも考慮に入れて最適化をすることが必要であるがここでは複雑になるのでここでは$u(0)=0$とする．この問題は初期値補償問題と呼ばれている．図 4.11 からわかるようにこの制御系は積分動作を含むものであり，1 型となっていることからステップ目標値およびステップ外乱に対して定常誤差を零とできる．[27]

以上のことから，離散時間表現を用いて最適ディジタルサーボ系を構成した場合にも制御系構造は基本的には PI 制御となる．

第５章

結章

５．１　人体への効果検証

健康増進機能を付加した電動車椅子に乗ることにより，人体へどのような効果をもたらすかの評価実験をおこなった．実際に電動車椅子に乗っている方たちに試乗してもらい実験を行うのが最良だが，現段階は実験機であり，乗ってもらうことが困難だと考え，今回の実験では健常者での実験を行った．騎乗することにより筋電がどのように活動しているのかの計測実験を行った．

５．１．１　筋電図とは

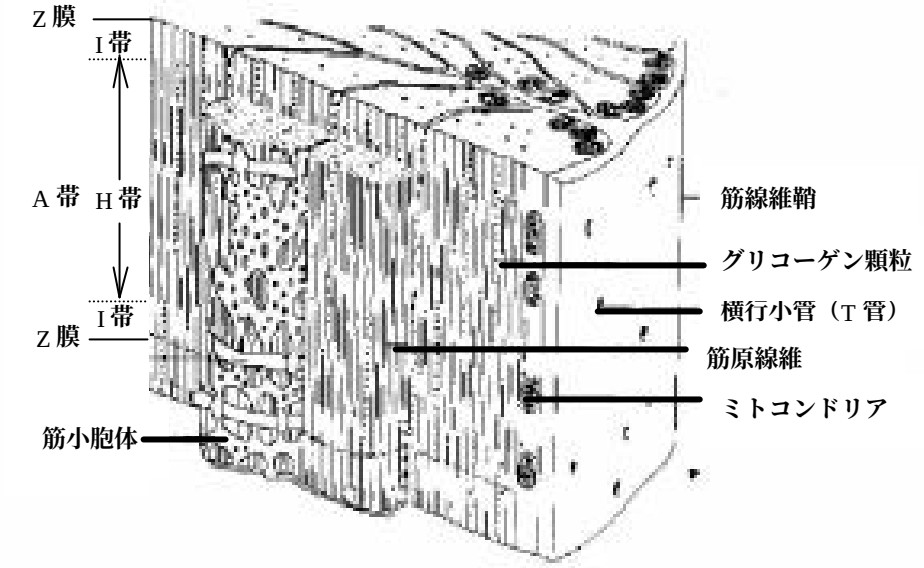


図 5.1　人体の細胞内

図 5.1 に人体の細胞内のモデルを示す．以下は参考文献[28]より引用した．
細胞膜には ATP のエネルギーを使ってナトリウムイオン（Na+）を細胞外へ，カ

リウムイオン（K+）を細胞内へ能動的に輸送するシステム Na+-K+ポンプ）があり，細胞内には K+，細胞外には Na+が多いイオン勾配が生じる．これにより，骨格筋細胞の内部は細胞外に比べて負の電位をもち，これを静止膜電位と呼ぶ．

興奮性細胞である骨格筋細胞は，刺激を受けるとその部分だけ膜のイオン透過性が増し，細胞外の Na+が細胞内に流入する．その結果，その部分では，局所的に負の静止膜電位（分極状態）が崩れて外界と同じ正の電位状態へ向かう．これを脱分極と呼ぶ．この脱分極状態は，電位変化が小さければ何も起こらずもとの負の静止膜電位に復帰する（再分極；図　破線）がいったんある電位（発射レベル）を超えると，スパイク状の電位変化として急激に増大し，逆転して正の電位をもった後（オーバーシュート），初めにはすみやかに後にゆっくりと再分極化し（後脱分極），静止膜電位を超える反動（後過分極）を示した後，もとのレベルに復帰する．

この脱分極に始まりオーバーシュートから再分極へ向かう一連の膜電位の変化を活動電位と呼ぶ．１つの活動電位は，刺激となってその外側の静止膜電位を次々と逆転させ新たな活動電位を発生させていく．ただし，一度脱分極した部分はしばらくは電位的に興奮しにくくなる．（不応期）ため，興奮の連鎖は一定の方向に進み，後戻りはしない．この連鎖的な静止膜電位の逆転こそが，骨格筋細胞上における刺激の伝導の本体で，活動電位は筋形質膜を３～５m毎秒の速度で伝播する．われわれが筋の活動状態を知るために測定する筋電図は，活動電位（の総和）を導出・増幅したものである．

生体内の骨格筋細胞への刺激は，運動神経から放出される化学物質により与えられる．収縮刺激は，運動神経末端にあるシナプス小胞からの伝達物質アセチルコリン分泌として与えられ，アセチルコリンが筋細胞の運動終板膜にあるニコチン受容体で受容されると，筋形質膜の Na+-K+イオンチャンネルが開口して脱分極性の終板電位が発生し，これが両側に活動電位を発生させて骨格筋細胞表面全体へ刺激が伝導されていく．アセチルコリンは，その後コリンエステラーゼによりすみやかに分解され，筋形質膜は再分極へと向かう．

形質膜上を伝播した活動電位は，横行小管の膜壁を伝わって筋細胞の深部へ導かれ，筋小胞体へ伝達されると，筋小胞体の膜興奮を引き起こす．その結果，筋小胞体は貯蔵していたカルシウムイオン（Ca2+）を筋細胞内へ遊離する．この細胞内 Ca2+濃度が一定（約 10-6mol）以上になり，細胞内の Ca2+がトロポミオシン鎖上にあるトロポニン分子と結合すると，トロポミオシン鎖の位置がずれ，静止時には覆われている細いフィラメント中のアクチン鎖のミオシン結合部が露出する．一方，ミオシンは ATP を分解してエネルギーを獲得し，頭部（側枝）を回転させ，細いフィラメントが太いフィラメント上を滑走して収縮が起こる．このように，筋の収縮はまず筋形質膜の電気的な興奮を起点として始まり，続いて Ca2+の作用という化学

的過程を経て，機械的反応へ移る．筋形質膜の電気的興奮から機械的反応までをつなぐ一連の反応は興奮収縮連関と呼ぶ.

１９５１年にすでに De Lorme と Watkins はトレーニングによる筋力増加の時間的経過のなかで，少なくとも２つの要素が関与していると仮説を立てた．彼らによれば，初期の筋力増加が筋の形態学的変化（筋の横断面積）以上に早くから認められることから，運動学習効果が筋力発揮に大きな影響を及ぼすとしている．その後の研究で, Ikai と Fukunaga は１００日間のアイソメトリックストレーニングでは, ９２%の筋力増加を認めたが，筋横断面積（筋肥大）は約２３%しか増大しなかったと報告している．とくに，筋力トレーニング初期の筋力増加には，超音波法で測定した筋横断面積にほとんど変化が認められなかったことを指摘している．さらに, Ikai と Steinhaus は催眠や，かけ声，薬物などによりヒトの最大筋力が有意に変化する事実を認め，脱制止（disinhibition）現象による神経・筋の興奮水準の変化に依存している可能性を示唆している．いわゆる“火事場の馬鹿力”と称されるものがこの典型的な例であろう.

これらの結果から，Ikai と Fukunaga は，トレーニングにおける筋力増加には, ①運動単位の放電量の増加（筋興奮水準），②筋収縮組織の形態学的変化（金肥大）の要素が関与していると仮定した．換言すると，筋力トレーニングにおける最大筋力の増加は，筋興奮水準を決定する神経的要因と筋肥大の両因子に依存すると考えられる.

運動ニューロンの興奮は筋電図（electromyogram : EMG，運動単位動員数とインパルス発射頻度の変化に依存する電気信号の時間・空間的総和）活動として記録される．したがって，ヒトの運動調節における運動ニューロンの興奮の側面を観察することは容易であり，比較的よく研究されてきた．図　は上腕二頭筋から導出した筋電図で，緊張力の漸増的増加に伴い，ほぼ直線的に筋放電量が増大することが理解できる.

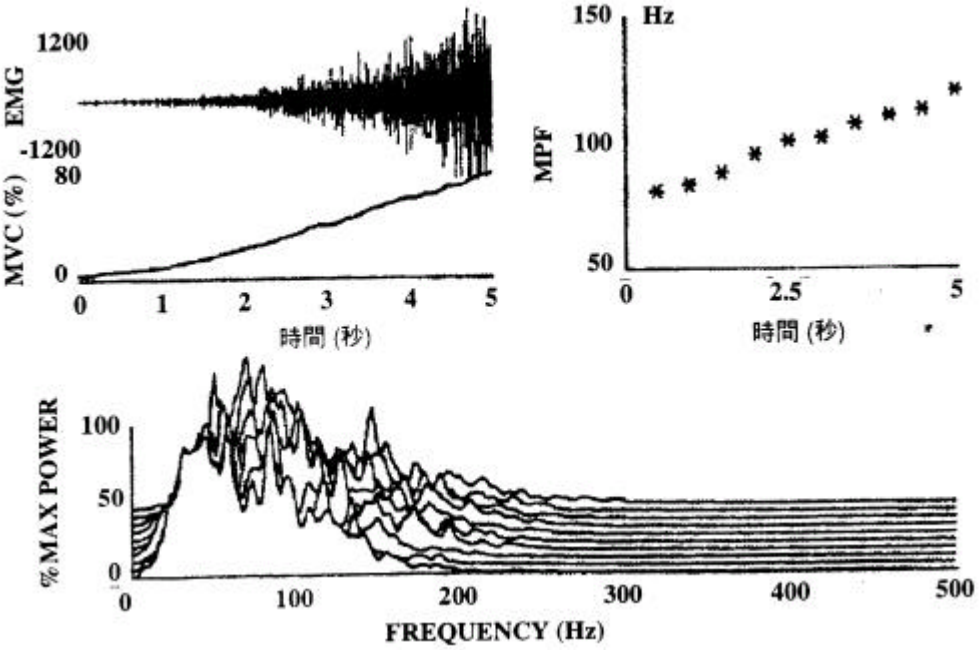


図 5.2　漸増的な筋力発揮時における筋放電特性

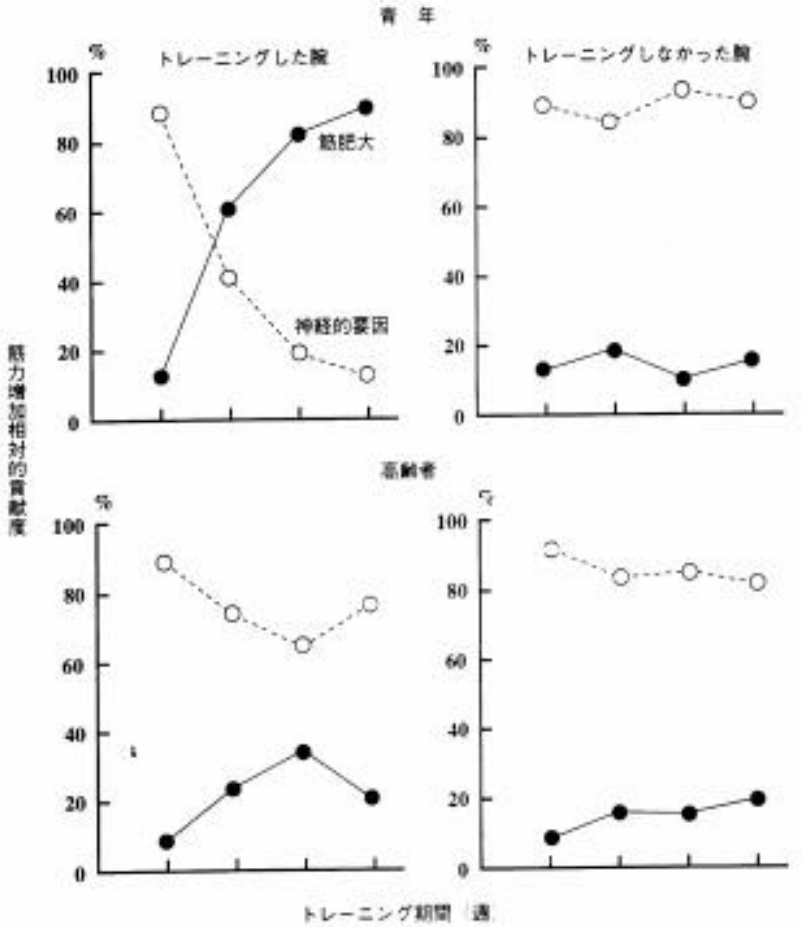


図 5.3　筋力トレーニングにおける筋肥大と神経的要因の相対的貢献度

Moritani と deVries は一連の筋電図学的研究によって Ikai と Fukunaga の仮説の裏づけを行い，初期の筋力増加が運動単位参画パターンの同期化や興奮水準レベルの上昇などに依存しており，神経的要因の改善によってもたらされることを明らかにした．図 5.3 をみても分かるとおり，さらに大学生と高齢者（平均年齢６９．６歳）を同一条件下(2/3 最大筋力漸増負荷法，10 回×3 セット，週 3 回，8 週間)でトレーニングさせた場合，両者グループに有意な筋力増加（高齢者：6.2kg，大学生：11.8kg）が認められたが，その生理的適応機序が異なることも明らかにした．筋力トレーニング初期では高齢者も大学生も神経的要因（運動単位参画パターンの改善，インパルス発射頻度の増加などに伴う最大筋放電量の増加）によって筋出力は増加しているが，トレーニング後期では筋肥大による筋力増加が大学生において顕著になっている．高齢者の場合，筋肥大の傾向を示すが，大部分の筋力増加が神経的要因の改善によってもたらされていることが理解できる．

以上のことから，電動車椅子に乗車することにより筋力増加の可能性を示すことができる，筋放電量を計測するため評価実験を行った．

５．１．２　計測実験

次に筋放電を計測するためのシステムについて図　　に表す．

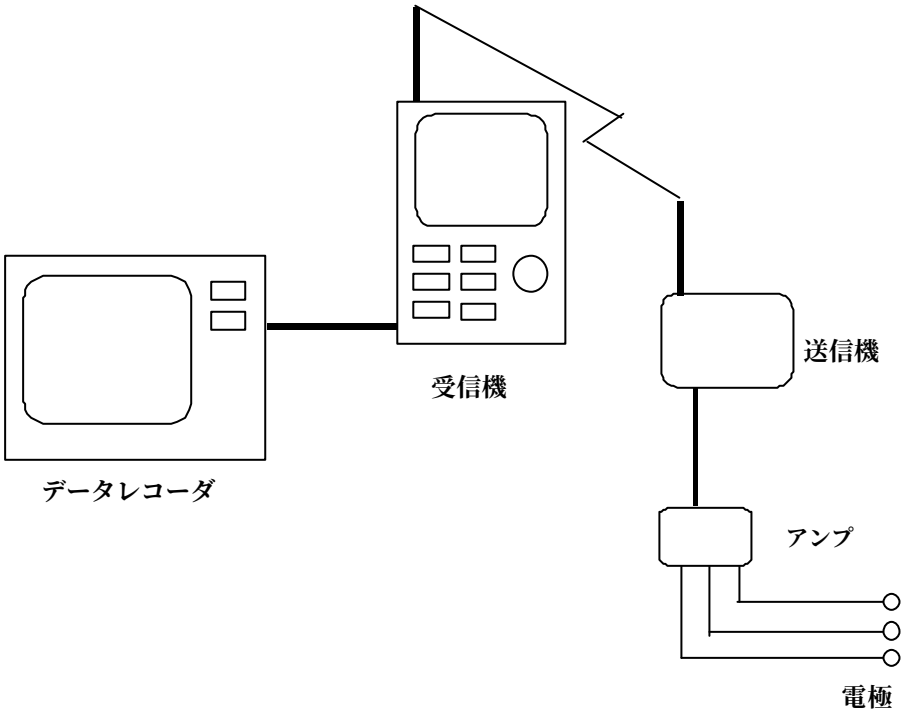


図 5.4　筋電計測のシステム構成図

電動車椅子に騎乗している被験者に貼り付けた電極から筋電のデータを採取する．被験者は平均年齢２２歳男子８名．実験内容は座面を左右１０度３０度，前後１０度２０度３０度に傾かせ，速さを遅いものと速いものの計１０パターンで筋放電を見る．筋放電の計測部位は Ｔｈ７（右），Ｌ１（右），Ｌ４（右），ハムストリング（左右），OBL（右），ABD（右），ADD（左右），QUAD（左右）の計１１箇所である．騎乗開始から１分後から計測を開始した．以下の写真は計測部位と実験風景である．

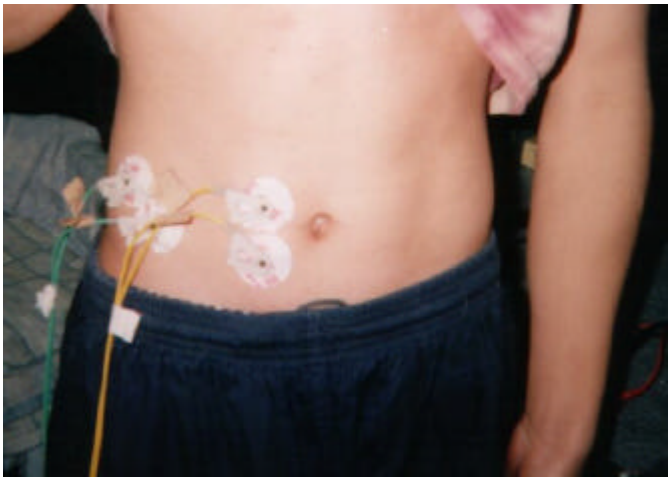


図 5.5　計測部位

図 5.6　　計測部位

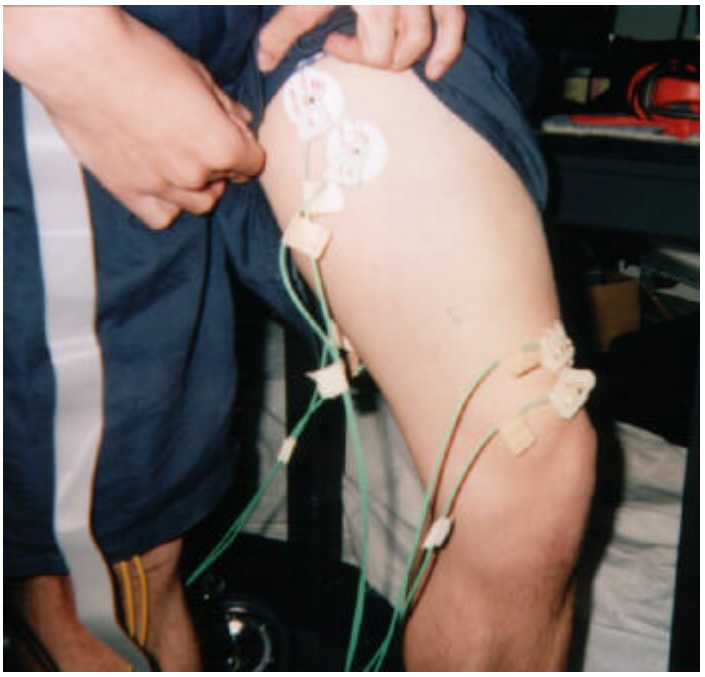


図 5.7　　計測部位

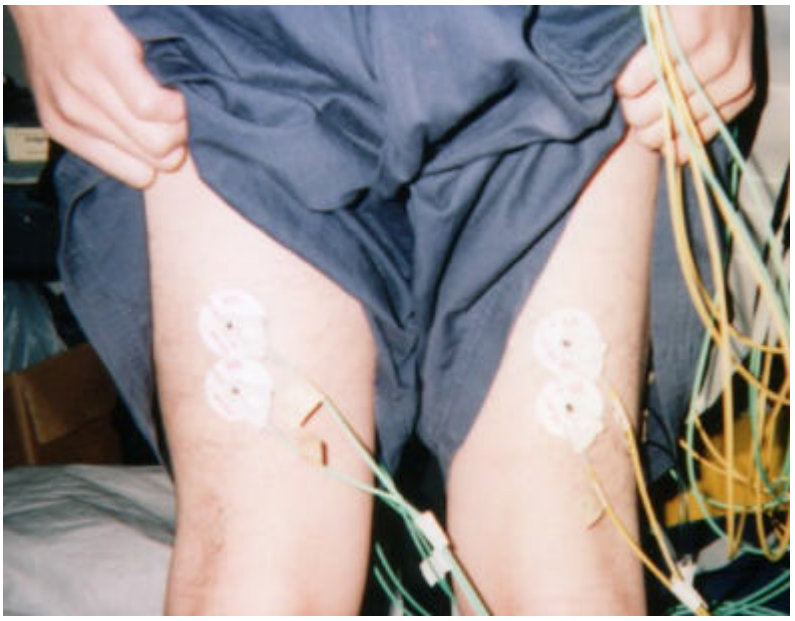


図 5.8　　計測部位

図 5.9　　実験風景

図 5.10　　実験風景

モータの駆動制御実験を行った．座面を左右１０度，３０度，前後１０度，２０度，３０度に傾かせ，速度を遅いものと速いものとで制御をした．まず，第３章の３．１で説明した式(3.14)，(3.15)，(3.16)を用いて円板の角度をもとめた．

以上より，筋電の計測を行った．筋電図は参考資料に添付する．

５．１．３　解析

解析方法は電動車椅子に乗っているときの筋放電量と人が負荷を与えた時の筋力，すなわち最大筋放電量のそれぞれの絶対値の積分値を比較する．

図 5.11　　最大筋力計測

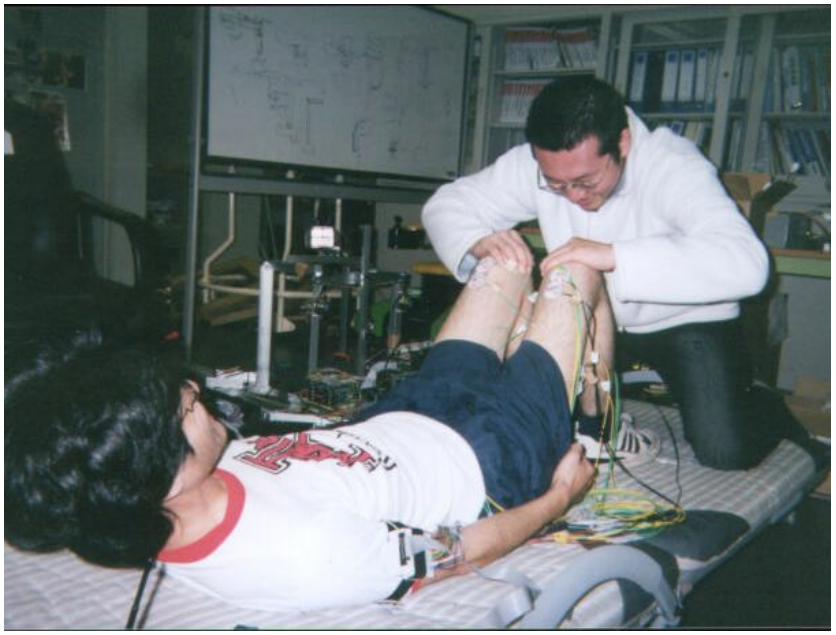


図 5.12　　最大筋力計測

図 5.13　　最大筋力計測

図 5.14　最大筋力計測

図 5.15　最大筋力計測

以上のように測った最大筋力に対しての筋力をそれぞれ速さ，部位，座面の角度によって解析したところ以下のような結果が得られた.

	速度	傾きの種類	背中	腹	下肢
A	遅い	前後１０度	7.0%	1.2%	28.1%
		前後１５度	9.7%	1.4%	29.1%
		前後３０度	7.3%	1.3%	24.0%
		左右５度	5.8%	1.2%	14.0%
		左右１５度	8.5%	2.1%	33.7%
	速い	前後１０度	16.1%	1.8%	23.6%
		前後１５度	15.9%	2.3%	22.2%
		前後３０度	15.8%	2.0%	26.9%
		左右５度	6.4%	1.4%	19.4%
		左右１５度	11.6%	3.2%	29.7%
B	遅い	前後１０度	4.4%	2.6%	8.4%
		前後１５度	4.4%	2.4%	7.7%
		前後３０度	4.3%	2.1%	8.4%
		左右５度	8.5%	1.9%	5.2%
		左右１５度	7.5%	4.6%	12.3%
	速い	前後１０度	5.4%	2.0%	6.8%
		前後１５度	5.2%	2.0%	7.5%
		前後３０度	6.7%	3.0%	6.8%
		左右５度	8.1%	2.3%	8.1%
		左右１５度	6.2%	2.5%	6.4%
C	遅い	前後１０度	12.5%	5.3%	26.3%
		前後１５度	15.1%	5.6%	51.6%
		前後３０度	25.2%	10.0%	77.9%
		左右５度	12.6%	3.6%	7.6%
		左右１５度	14.5%	3.4%	9.3%
	速い	前後１０度	16.2%	4.8%	31.9%
		前後１５度	18.4%	4.7%	25.5%
		前後３０度	17.3%	5.0%	23.2%
		左右５度	17.3%	3.3%	7.2%
		左右１５度	15.7%	3.8%	9.8%
D	遅い	前後１０度	6.1%	15.3%	15.1%

		前後15度	4.4%	23.6%	14.1%
		前後30度	4.9%	19.6%	14.0%
		左右5度	3.4%	2.5%	12.9%
		左右15度	5.7%	4.1%	18.4%
	速い	前後10度	8.0%	24.6%	15.5%
		前後15度	5.8%	30.1%	15.8%
		前後30度	7.4%	40.5%	30.2%
		左右5度	3.8%	3.0%	9.6%
		左右15度	7.9%	4.1%	37.1%
E	遅い	前後10度	10.6%	16.2%	15.2%
		前後15度	10.1%	7.9%	16.5%
		前後30度	11.9%	6.3%	19.0%
		左右5度	5.3%	2.7%	6.4%
		左右15度	8.3%	3.7%	9.7%
	速い	前後10度	6.2%	10.5%	13.2%
		前後15度	10.2%	12.8%	17.2%
		前後30度	6.9%	7.7%	23.6%
		左右5度	5.1%	2.8%	6.8%
		左右15度	7.2%	3.1%	10.6%
F	遅い	前後10度	7.9%	16.7%	38.9%
		前後15度	9.2%	10.0%	41.0%
		前後30度	8.8%	8.9%	50.9%
		左右5度	4.5%	5.0%	10.1%
		左右15度	9.6%	11.9%	18.9%
	速い	前後10度	5.1%	7.6%	26.0%
		前後15度	4.1%	5.8%	22.3%
		前後30度	5.1%	6.1%	19.0%
		左右5度	7.6%	5.3%	24.7%
		左右15度	5.1%	7.1%	16.9%
G	遅い	前後10度	14.8%	5.8%	10.2%
		前後15度	13.3%	5.5%	9.0%
		前後30度	12.6%	5.0%	9.2%
		左右5度	16.8%	6.1%	7.3%
		左右15度	16.2%	8.1%	9.2%

	速い	前後１０度	18.6%	6.0%	9.6%
		前後１５度	13.7%	5.4%	9.3%
		前後３０度	13.2%	5.5%	10.1%
		左右５度	13.0%	5.0%	8.2%
		左右１５度	15.5%	7.2%	10.2%
H	遅い	前後１０度	10.9%	4.8%	9.4%
		前後１５度	15.7%	4.5%	8.9%
		前後３０度	17.7%	4.7%	8.9%
		左右５度	17.8%	5.5%	9.1%
		左右１５度	17.3%	10.4%	19.2%
	速い	前後１０度	21.1%	6.2%	39.3%
		前後１５度	9.6%	8.0%	9.2%
		前後３０度	9.2%	6.8%	9.1%
		左右５度	8.2%	13.9%	7.9%
		左右１５度	11.1%	12.7%	9.4%

表 5.1　筋電計測実験結果

上記の表 5.1 より，被験者全員が揺らされることによって筋電位がでていることがわかった．この結果より，筋力増加の可能性を示すことが分かり，円板を用いることによって健康増進機能を付加することに意味があることが分かった．

５．２　最後に

５．２．１　まとめ

これからますます，増加していくであろう電動車椅子を利用する高齢者や身体障害者に対して，ただの移動手段ではなく健康増進ができる電動車椅子の開発を行ったことについて述べた．健康増進機能を付加するために，座面の下に 3 つの円板を装着し，その円板を回転させることにより座面を揺動させた．この座面と３つの円板の関係式を導出し，ラグランジュ法により運動方程式を求め，その式を基に円板を回転させるためのモータ駆動のシミュレーションを行った．実際に，モータの駆動制御を行い，座面姿勢制御を行った．最後に，健常者による人体への評価実験をし，被験者全員に筋力増加の効果の可能性を示すことができた．

５．２．２　今後の課題

電動車椅子に乗車する人の体重や重心によって，座面が傾く速度や角度が変化す

ることが今回の評価実験で分かった．この問題を解決するために，モータの精度の見直し，また人が乗ることによっての重心の位置の変化の解析などを行うことが必要と思われる．

参考資料

街頭用アンケート

１．質問ですが、あなたは健康増進や維持に興味がありますか？

（はいのとき）　２．へ進む

（いいえのとき）　例えば座っているだけで筋肉がつくとしたらどう思われますか？

（良いのとき）　２．へ進む

（良くないのとき）　ご協力ありがとうございました。電動車椅子についてのご意見などがありましたらお聞かせ下さい。

（　　）

２．今までの電動車椅子は移動手段にすぎなかったと考えられます。そこで質問ですが、電動車椅子に健康が増進する機能を付けたほうがいいと思われますか？

（はいのとき）　３．へ進む

（いいえのとき）　理由をお聞かせ下さい。

（　　）

３．（先生の資料またはジョーバのパンフの動きのところを見せながら）
このように前後左右に揺らすと乗っているだけで筋肉が鍛えられて健康になることが実験でわかりました。もし、このような機能が電動車椅子についたとしたら使ってみたいと思いますでしょうか？

（はいのとき）　４．へ進む

（いいえのとき）　理由をお聞かせ下さい。

（　　）

４．（健康増進機能付き電動車椅子の写真を見せる）イメージとすればこう言うものになります。（また、ビデオを見せながら、）このように椅子の部分が揺れます。どうでしょうか？使用することに意義があるように考えられますでしょうか？

（はいのとき）　５．へ進む

（いいえのとき）　理由をお聞かせ下さい。

（　　）

５．もしこの電動車椅子が売り出されていた場合、何万で買いたいと思われますか？

１００万　８０万　６０万　４０万　３０万　その他（　　）万

老人介護施設用アンケート

１．質問ですが、あなたは今よりも元気になってみたいと思われますか？

（はいのとき）　２．へ進む

（いいえのとき）　例えば座っているだけで筋肉がつくとしたらどう思われますか？

（良いとき）　２．へ進む

（良くないとき）　ご協力ありがとうございました。　電動車椅子についてのご意見などがありましたらお聞かせ下さい。

（　　）

２．今までの電動車椅子は移動手段にすぎなかったと考えられます。そこで質問ですが、乗るだけでリハビリができる電動車椅子は良いと思われますか？

（はいのとき）　次へ進む

（いいえのとき）　理由をお聞かせ下さい。

（　　）

（資料を見せながら）

今考えているリハビリができる機能とは乗馬療法を用いたものです。馬に乗ってバランスをとることによりおなかの筋肉や背中の筋肉を鍛えることができ、排泄物がでやすくすることなどができます。それを利用した機能を車椅子につけようと考えています。

３．（ビデオを見せながら）

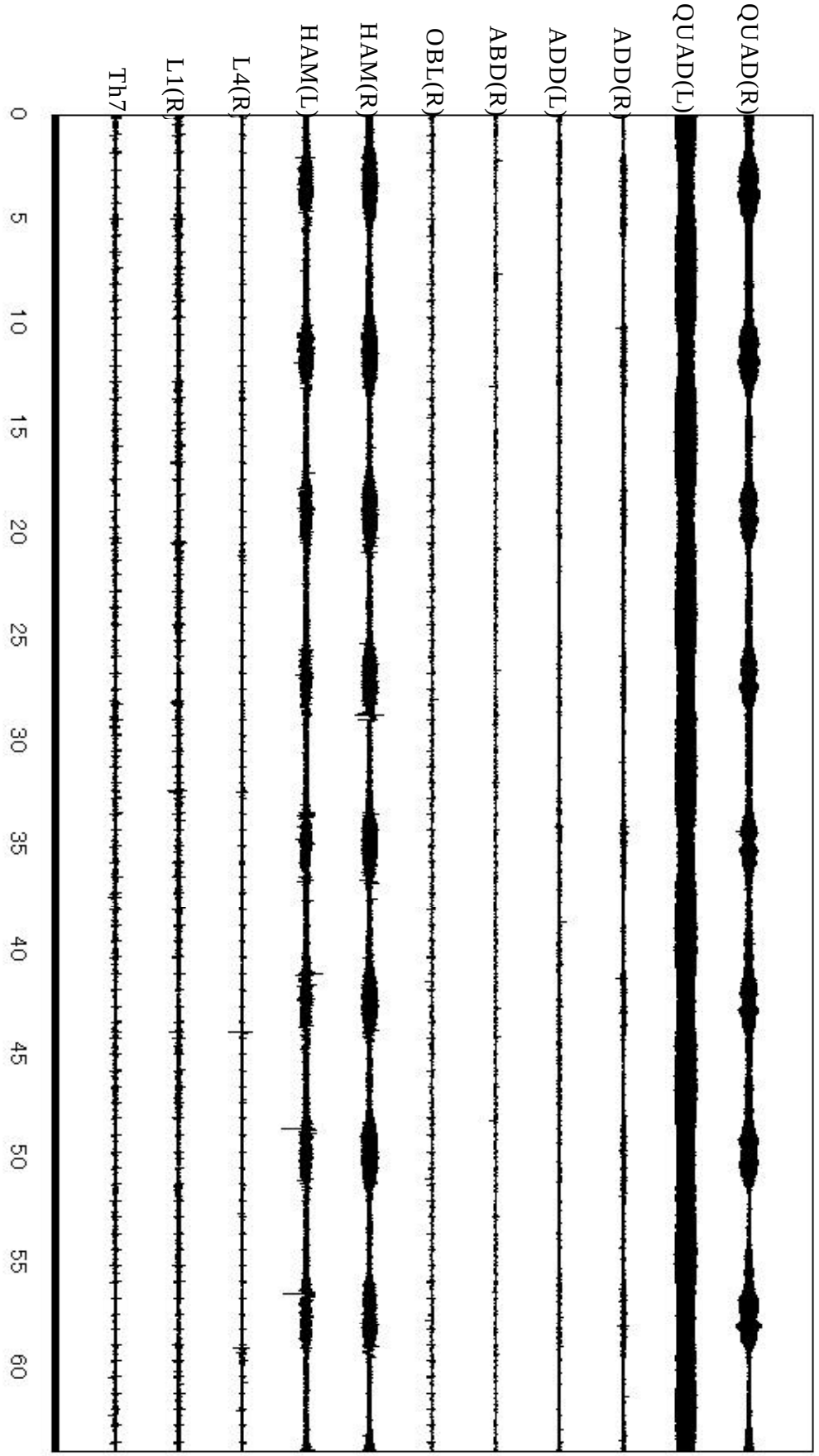
そのようなリハビリができる機能がついた電動車椅子です。このように前後左右に座席を動かすとバランスをとろうとすることにより、乗っているだけで健康になることが実験でわかりました。もし、このような機能が電動車椅子についたとしたら使ってみたいと思いますでしょうか？

（はいのとき）　４．へ進む

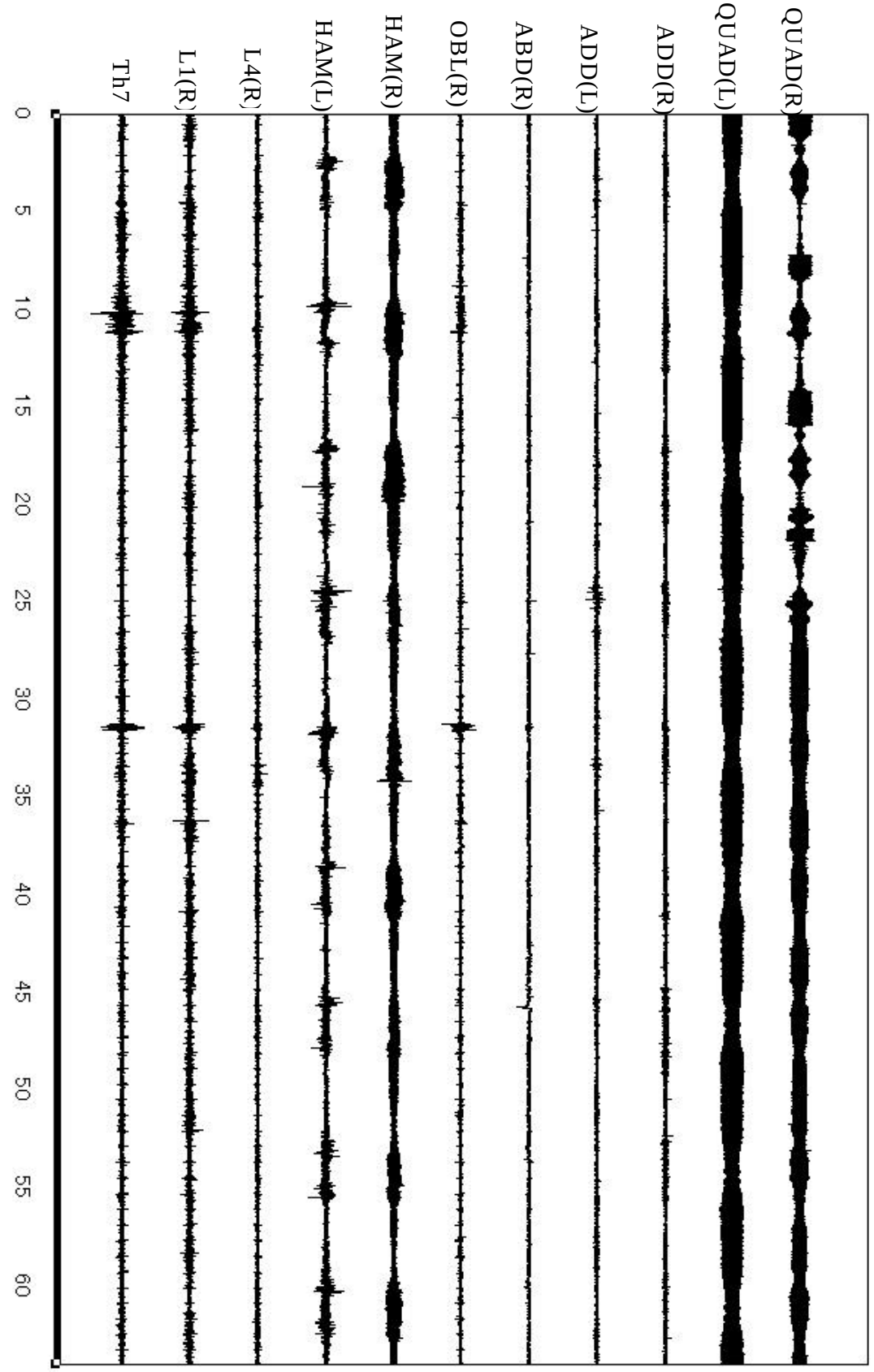
（いいえのとき）　理由をお聞かせ下さい。

（　　）

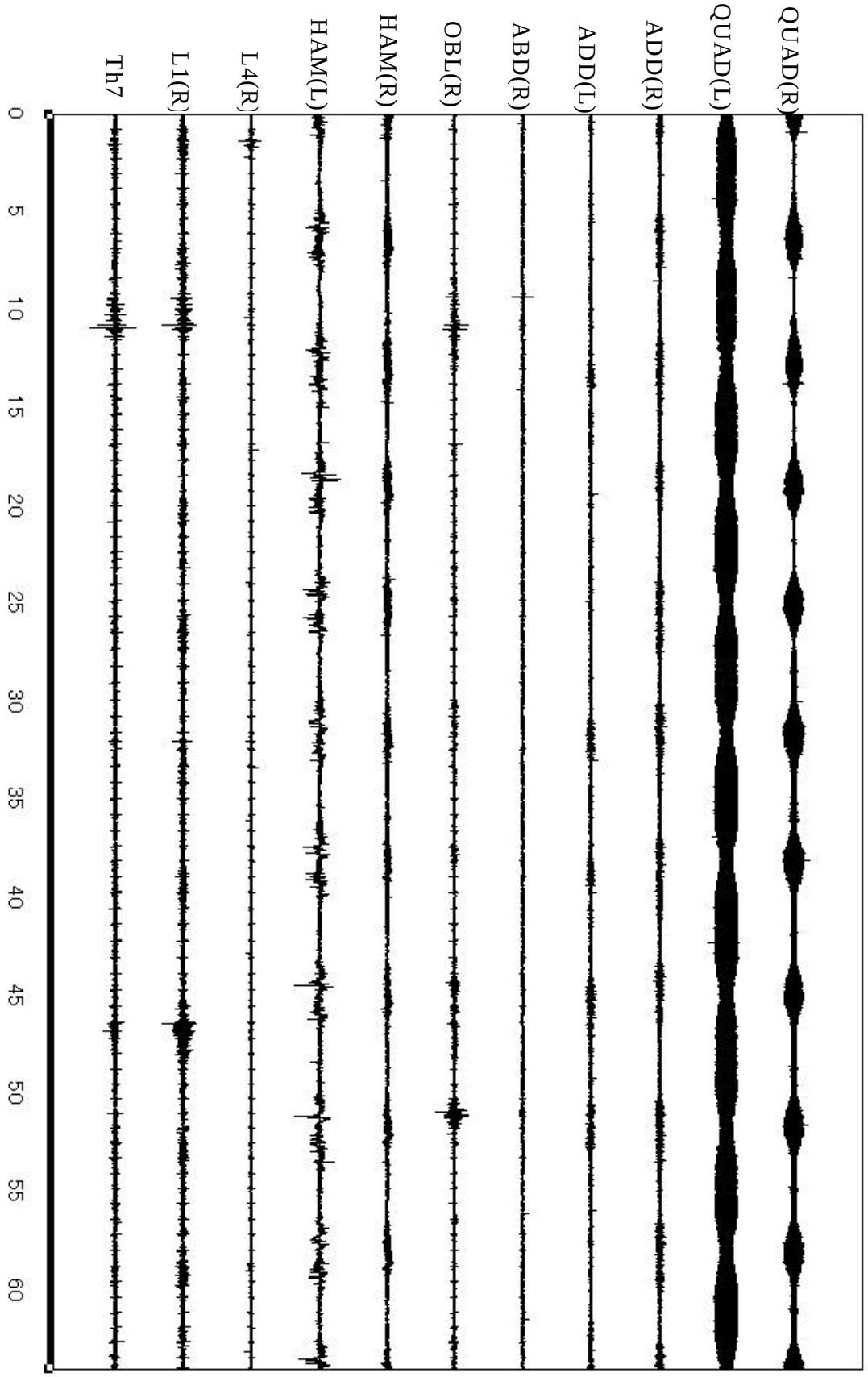
ありがとうございました。



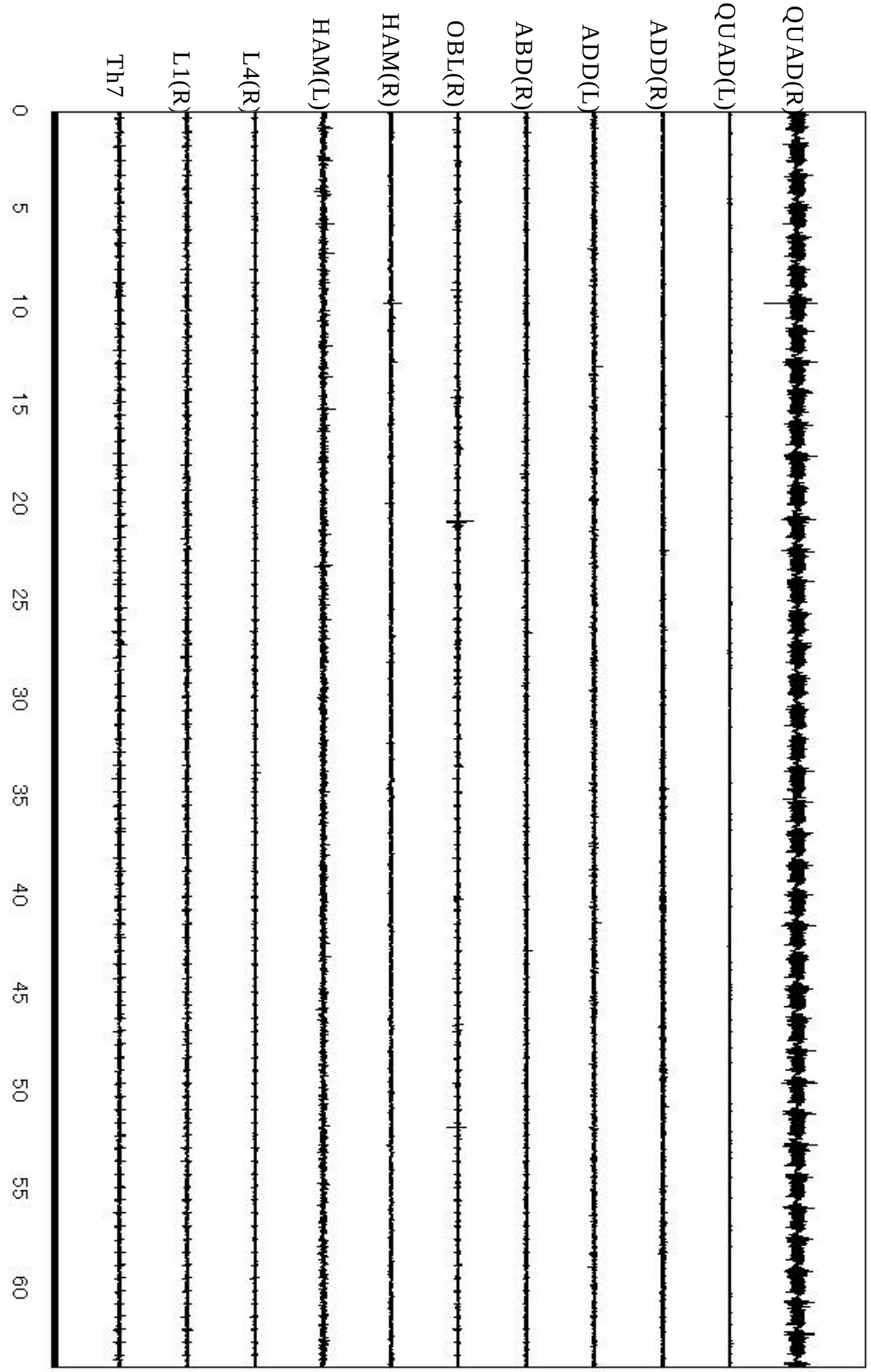
前後 10 度で速度が遅い場合



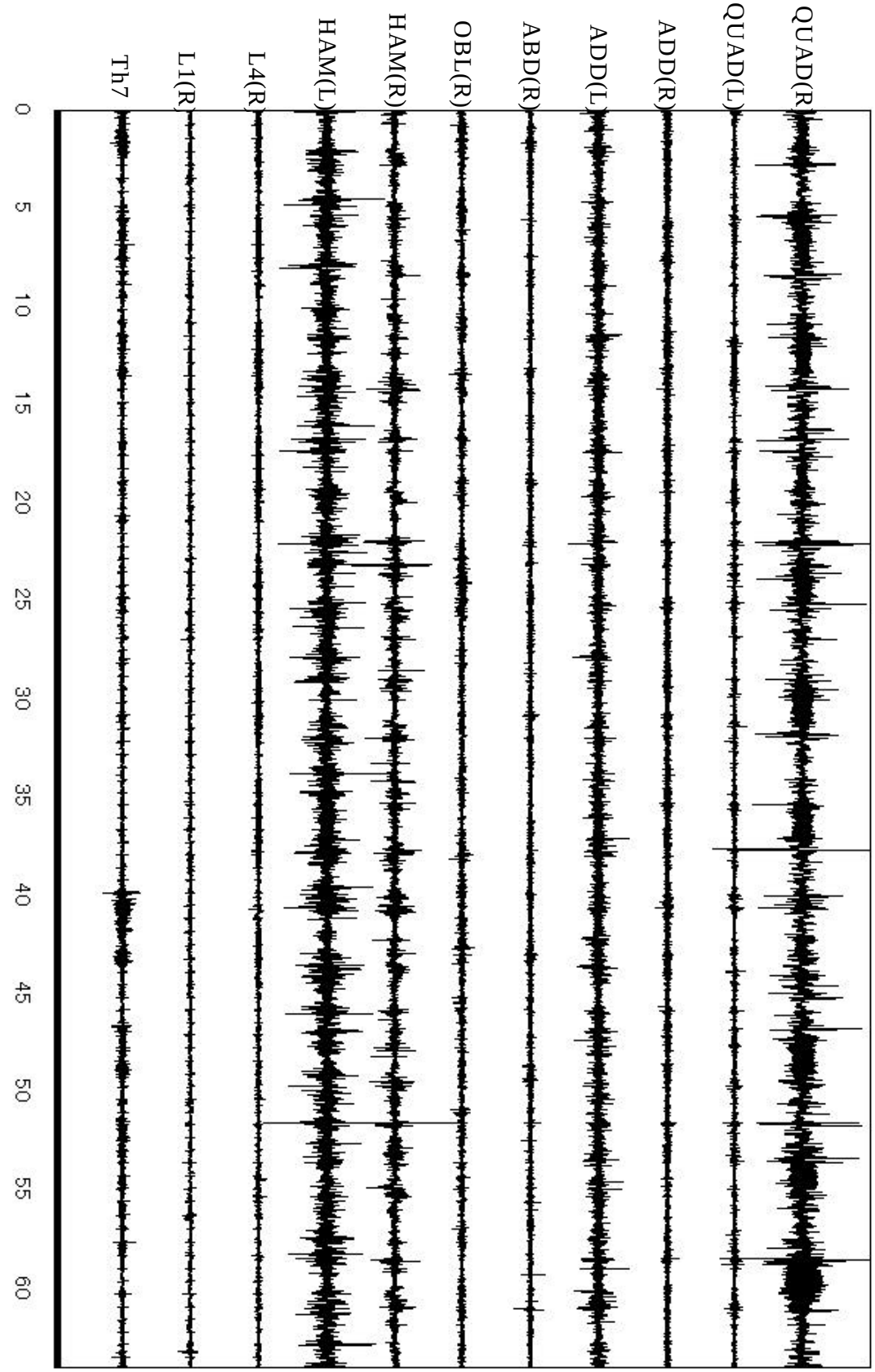
前後 15 度で速度が遅い場合



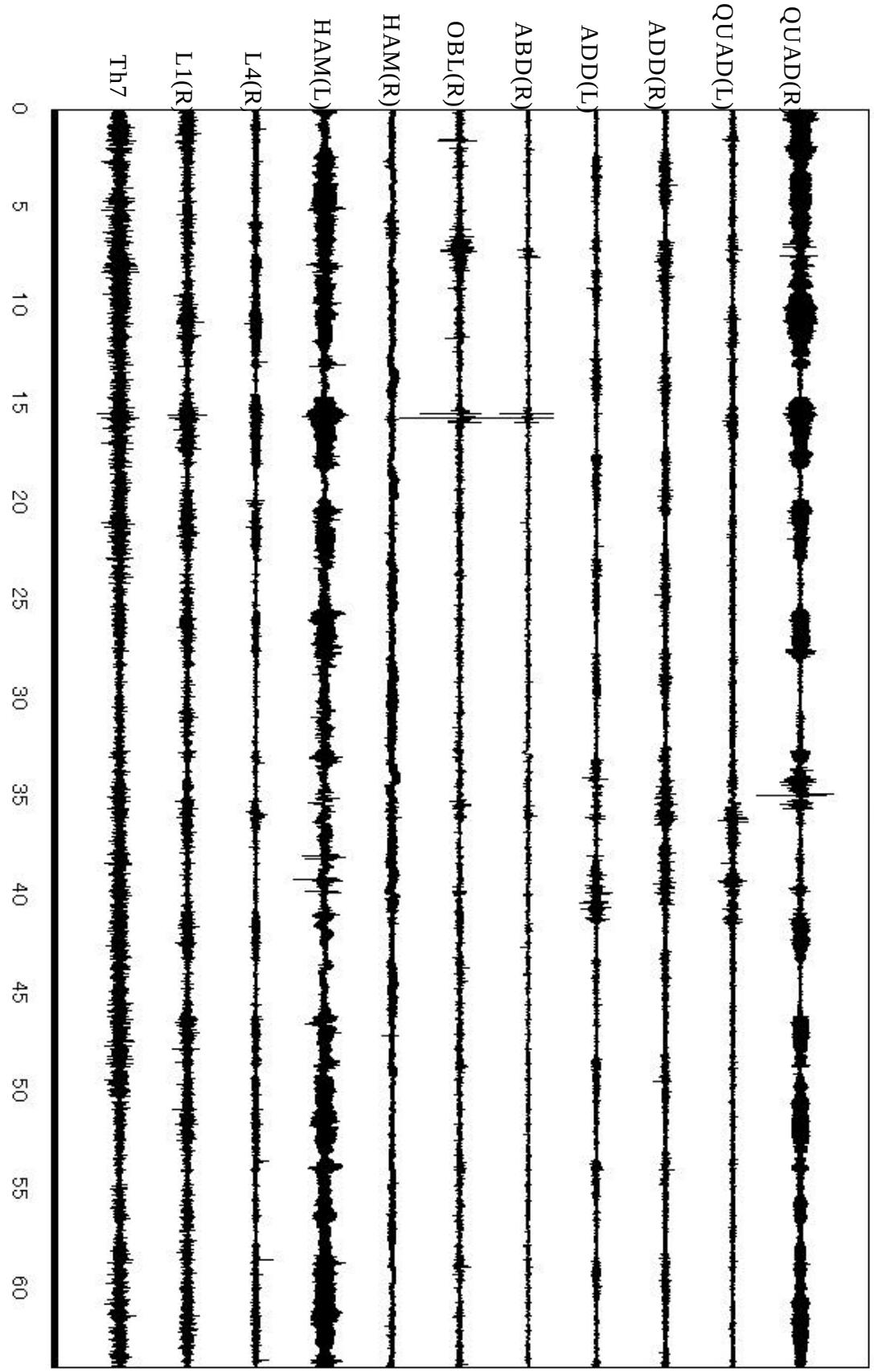
前後 30 度で速度が遅い場合



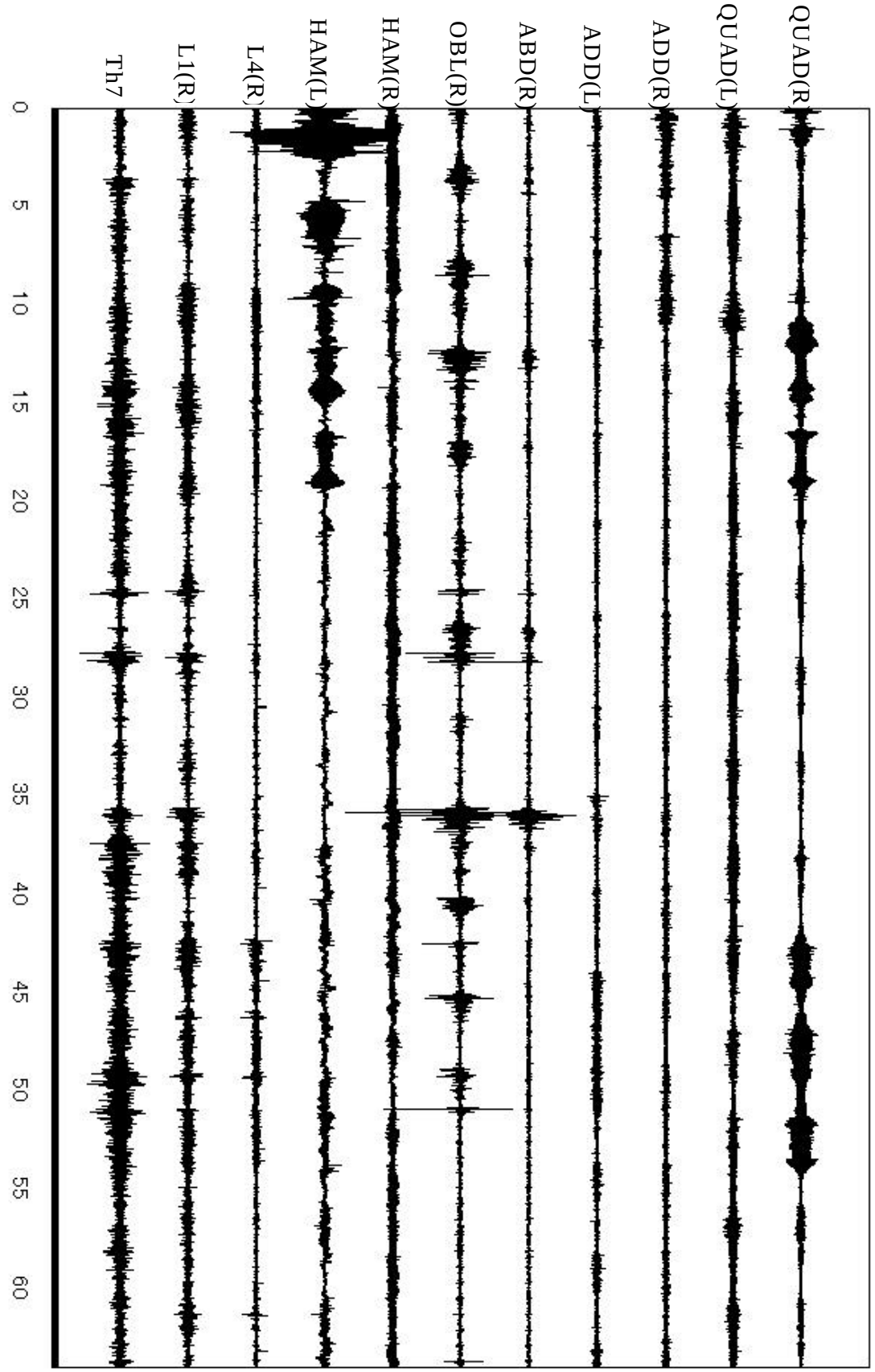
左右５度で速度が遅い場合



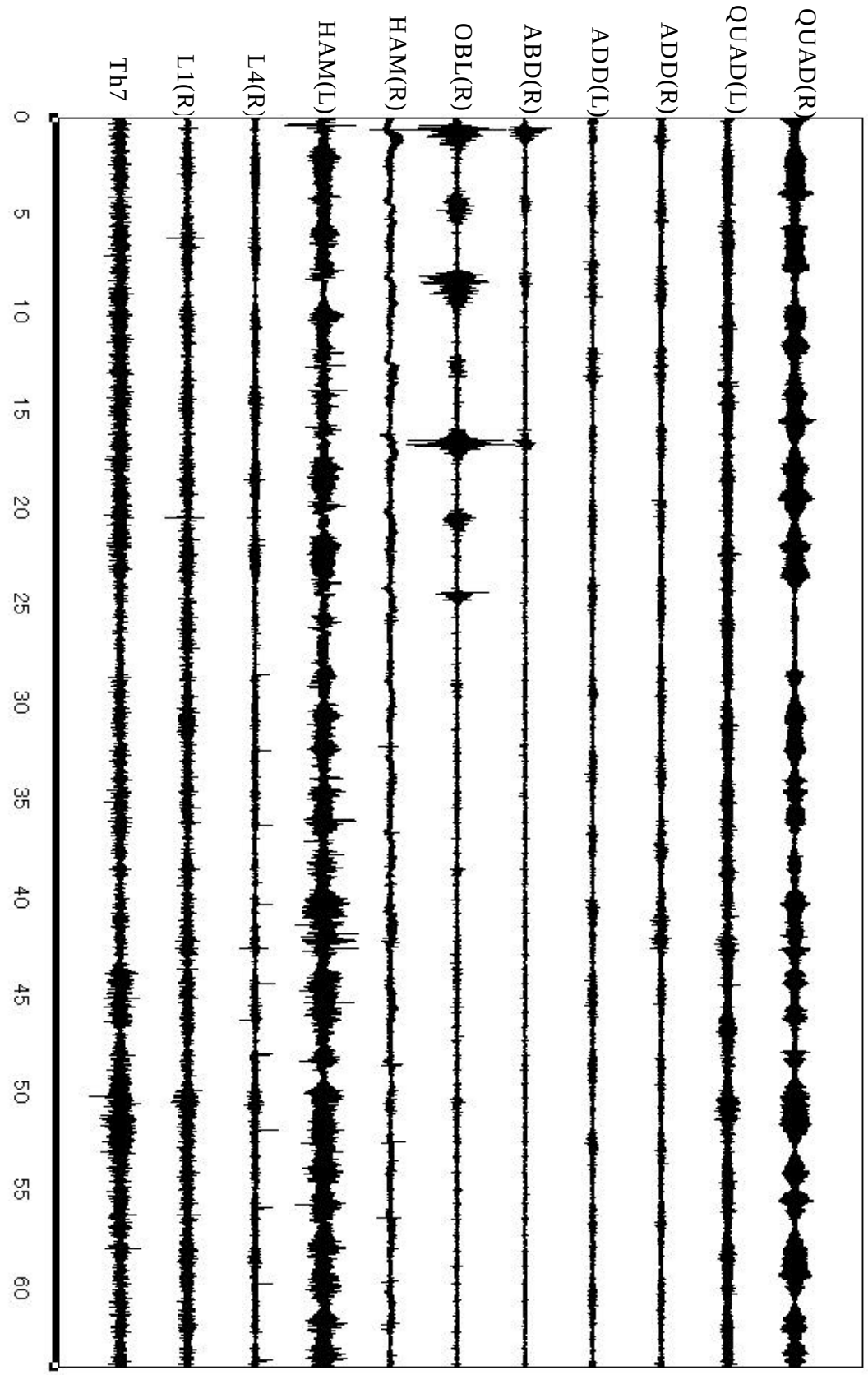
左右１５度で速度が遅い場合



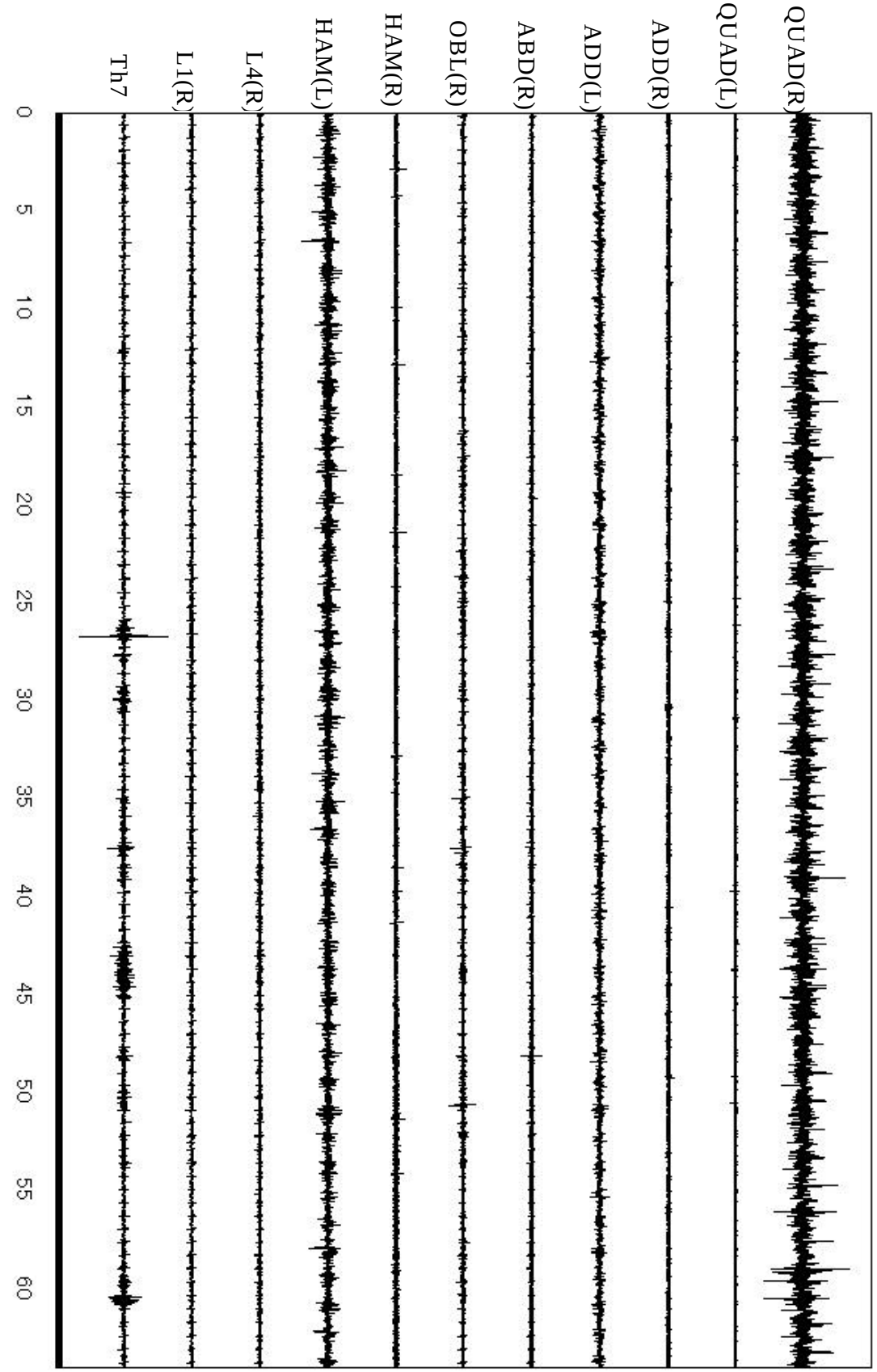
前後 10 度で速度が速い場合



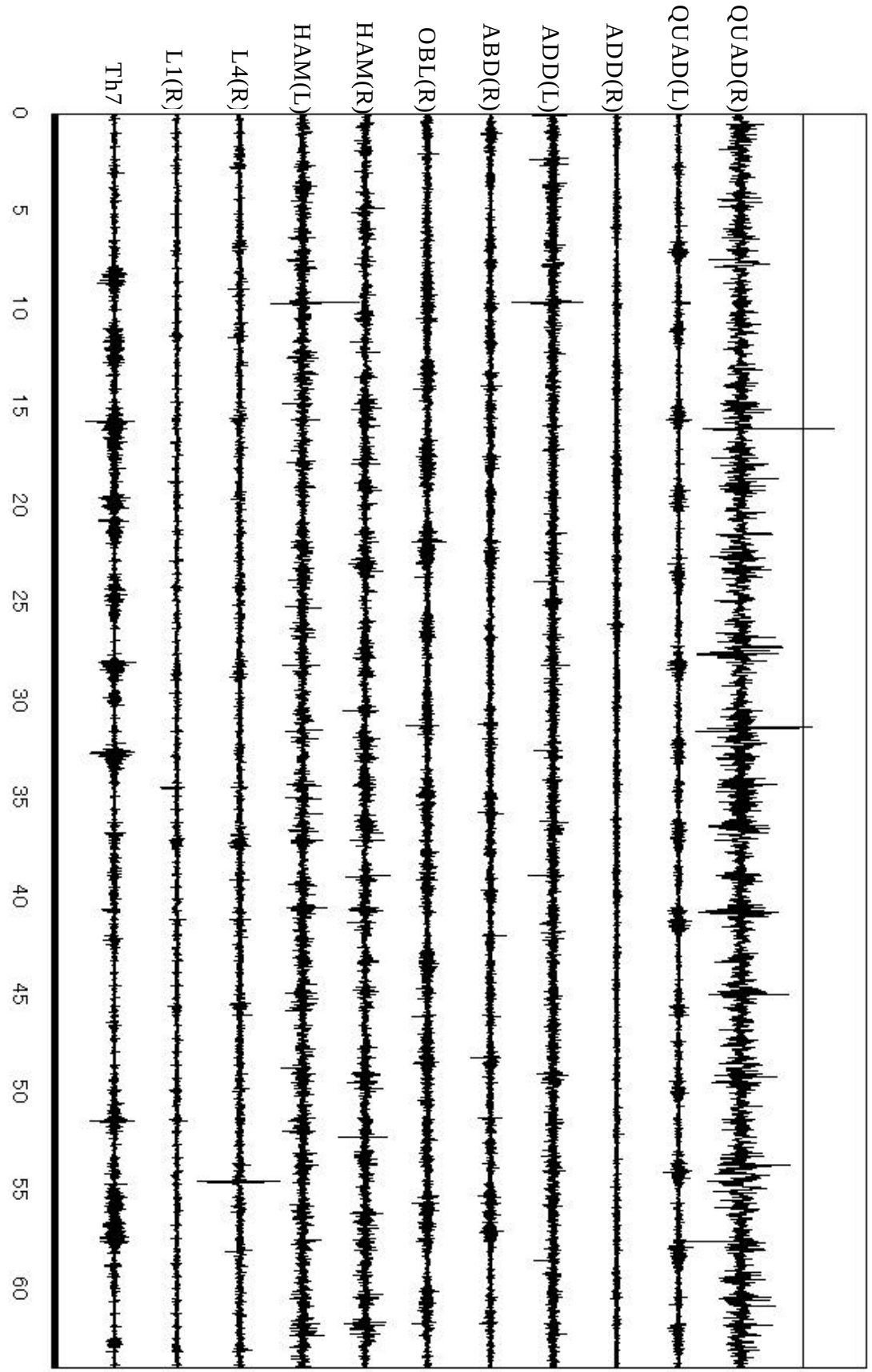
前後 15 度で速度が速い場合



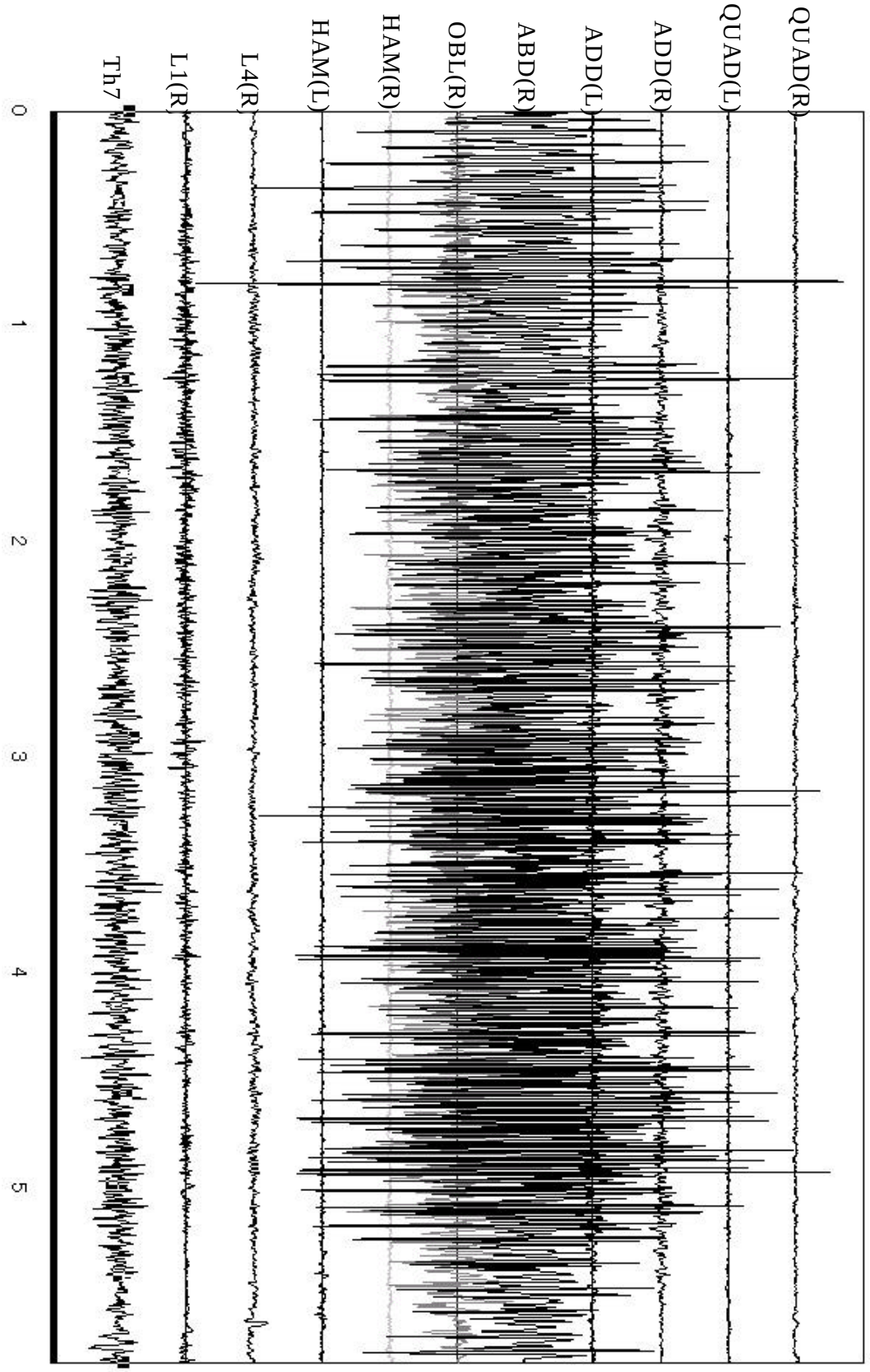
前後 30 度で速度が速い場合



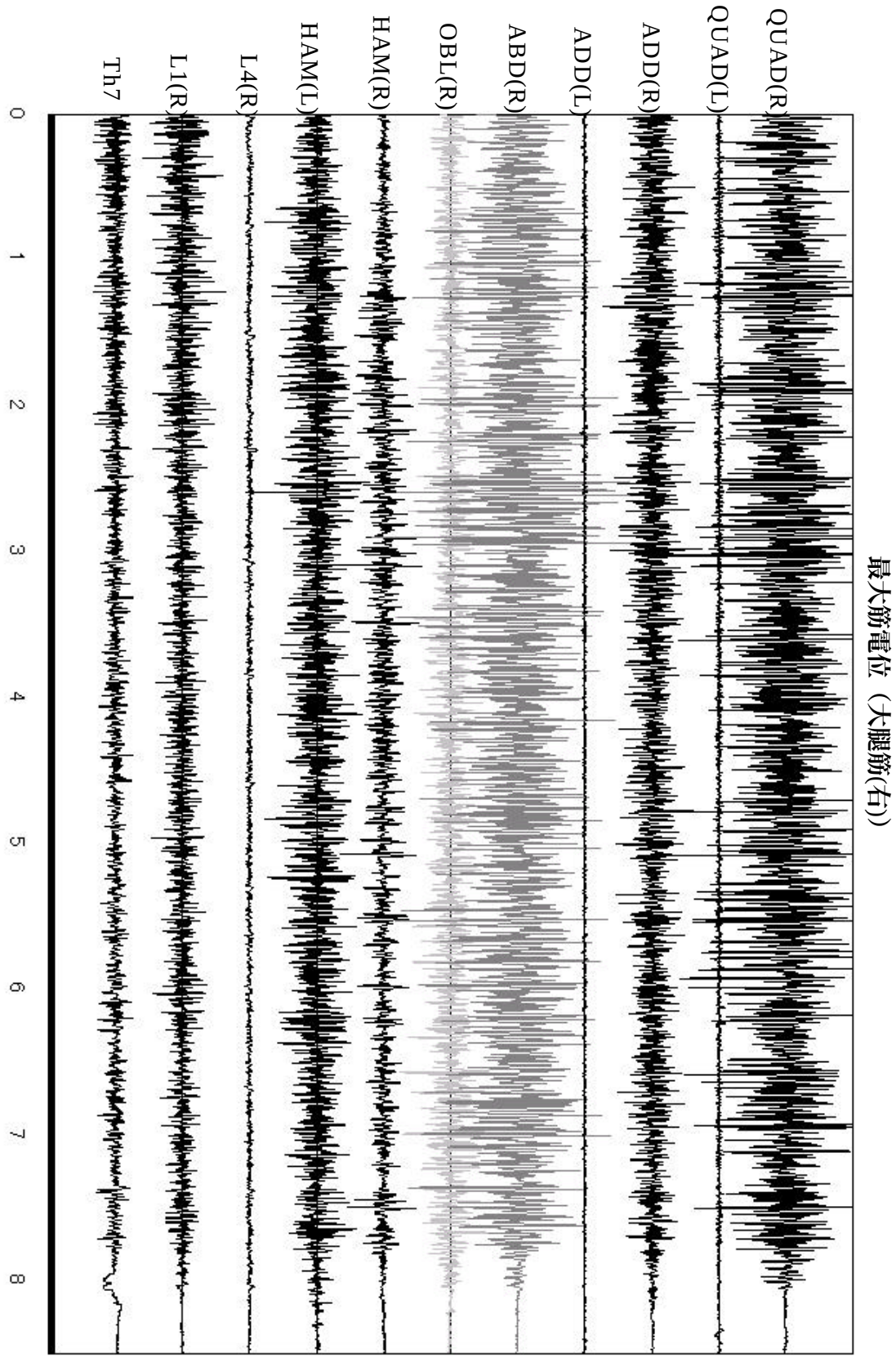
左右 5 度で速度が速い場合

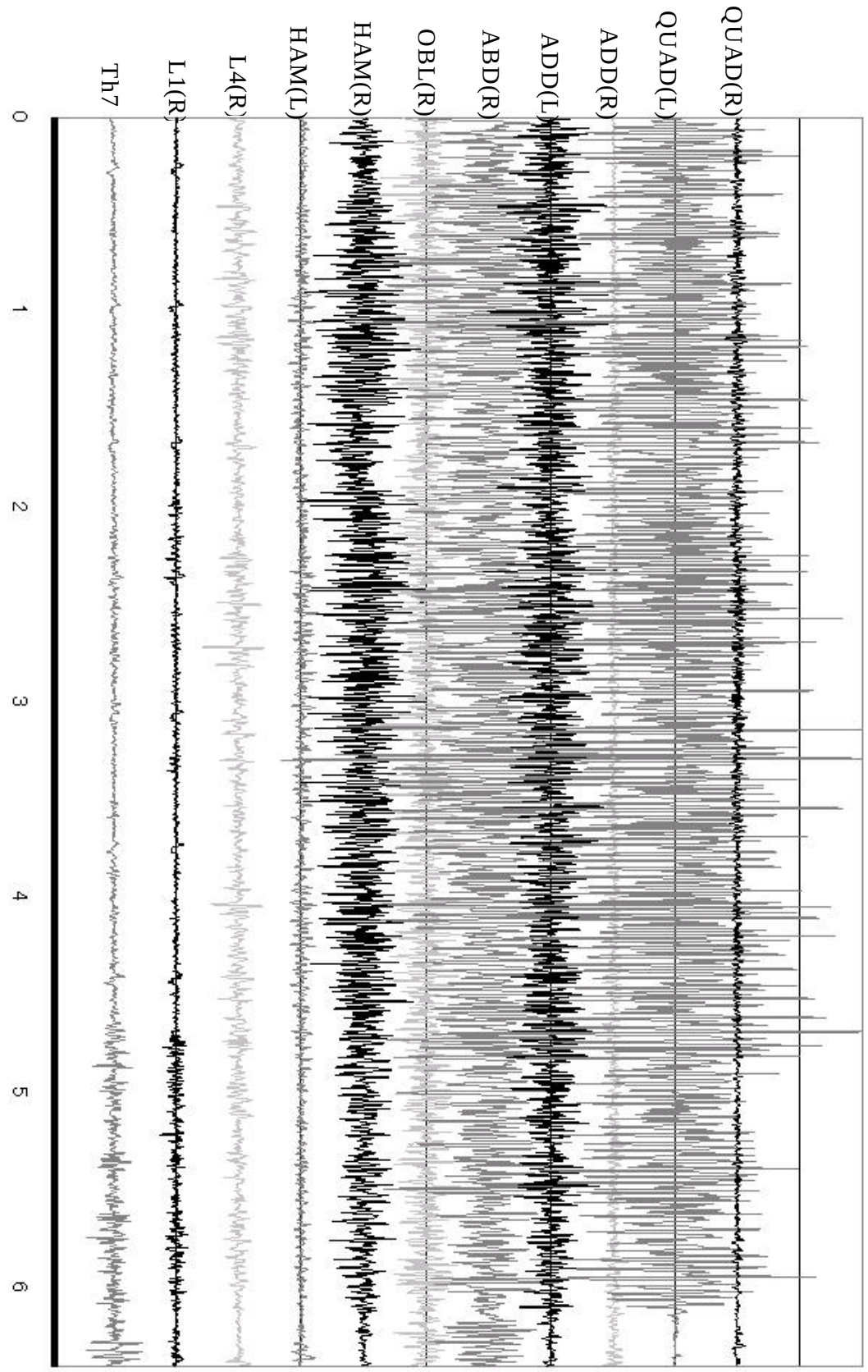


左右 15 度で速度が速い場合

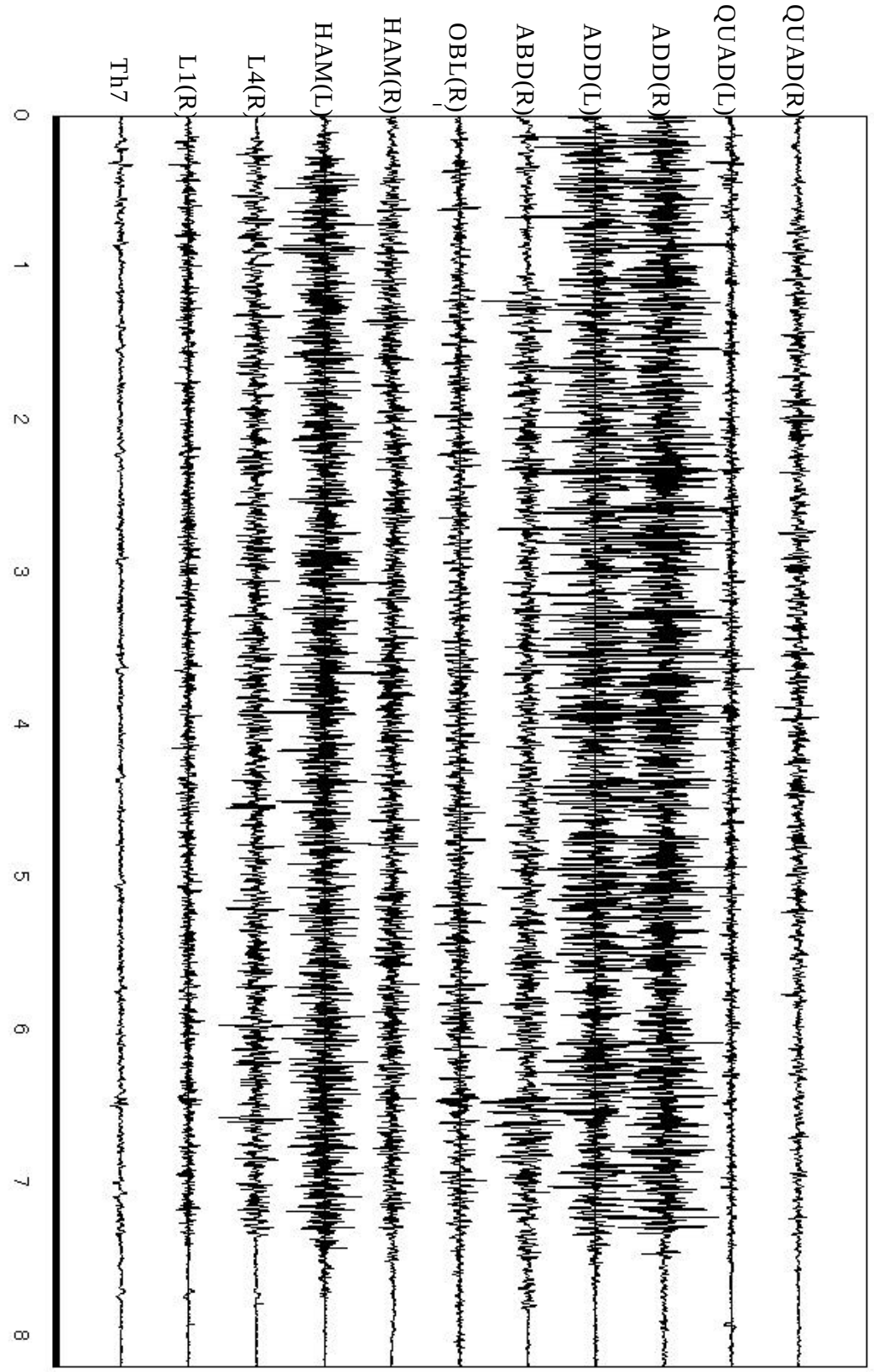


最大筋電位（腹筋）

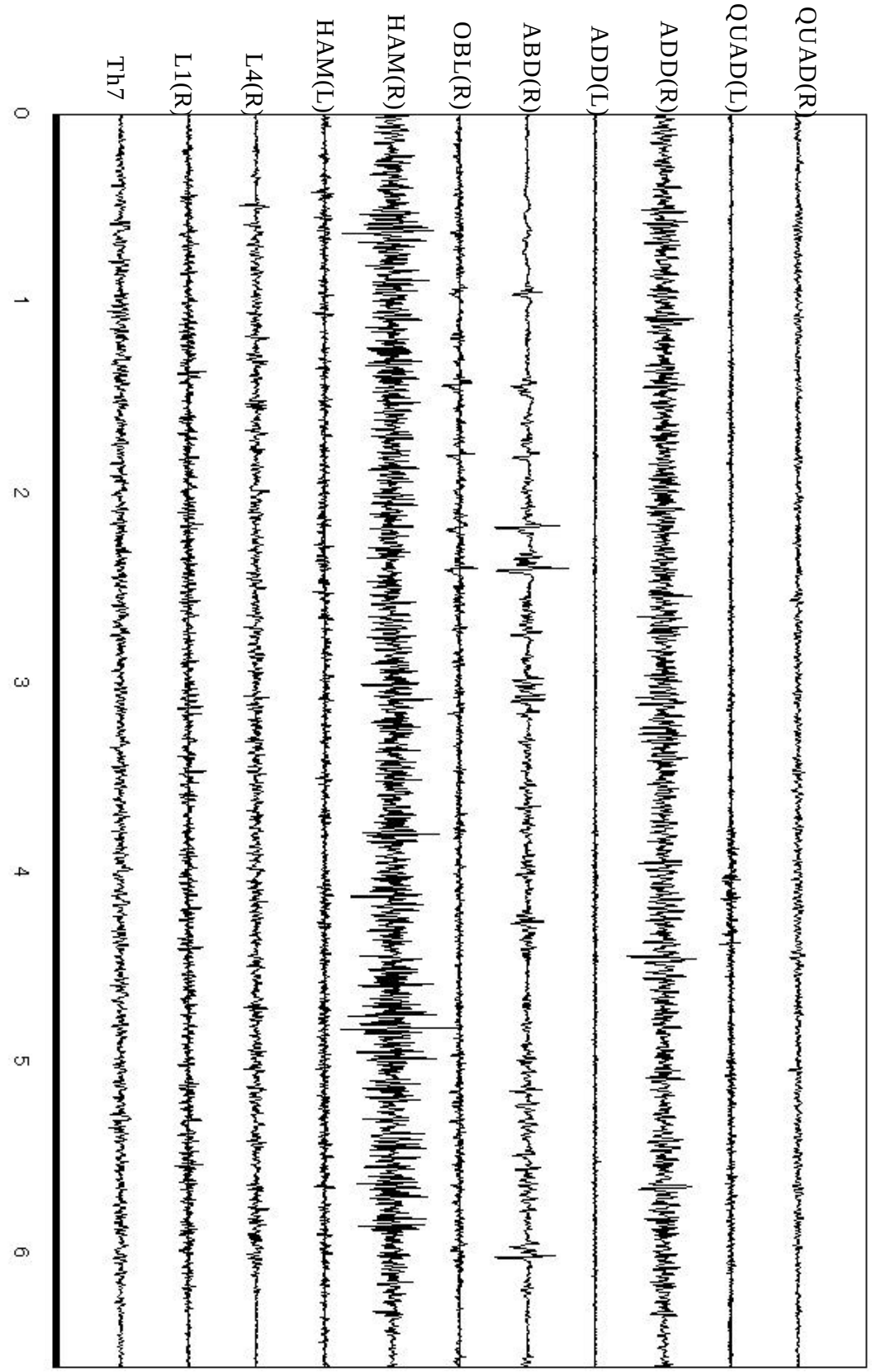

最大筋電位（大腿筋(右)）
QUAD(R)
QUAD(L)
ADD(R)
ADD(L)
ABD(R)
OBL(R)
HAM(R)
HAM(L)
L4(R)
L1(R)
Th7
0
1
2
3
4
5
6
7
8


QUAD(R)
QUAD(L)
ADD(R)
ADD(L)
ABD(R)
OBL(R)
HAM(R)
HAM(L)
L4(R)
L1(R)
Th7
0
1
2
3
4
5
6

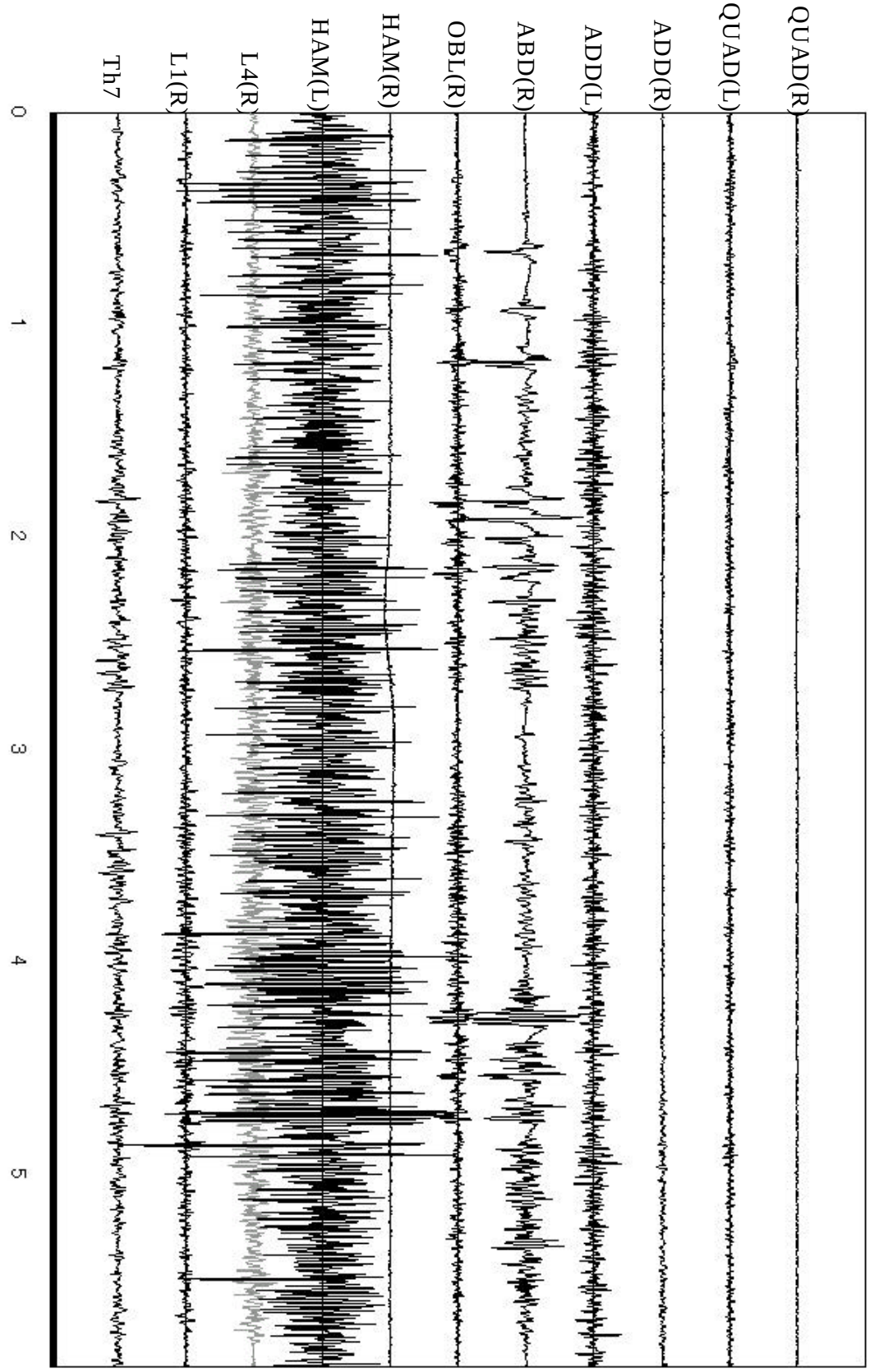
最大筋電位（大腿筋(左)）


QUAD(R)
QUAD(L)
ADD(R)
ADD(L)
ABD(R)
OBL(R)
HAM(R)
HAM(L)
L4(R)
L1(R)
Th7
0
1
2
3
4
5
6
7
8

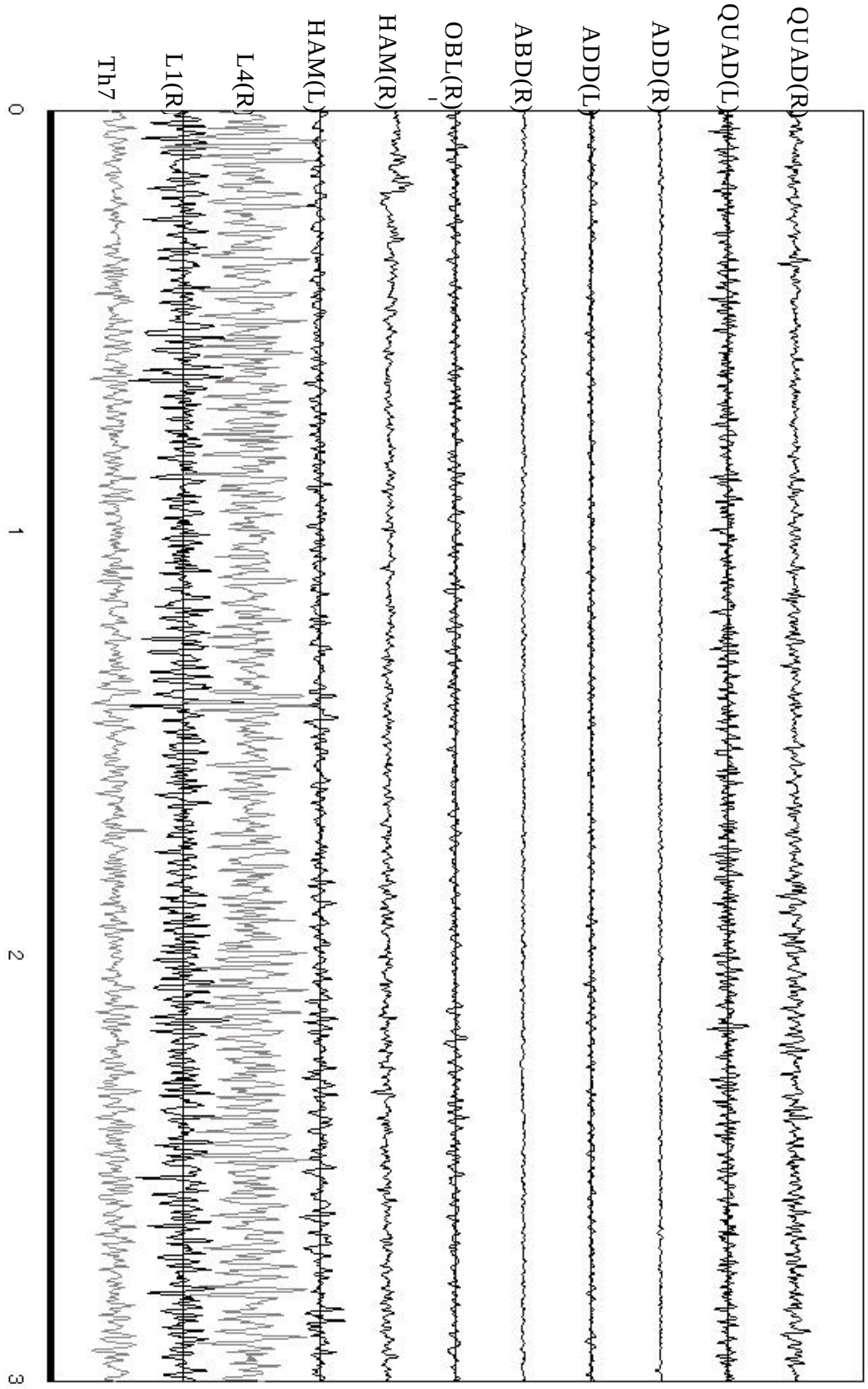
最大筋電位（内転筋）



最大筋電位（ハムストリング(右)）



最大筋電位（ハムストリング(左)）


最大筋電位（背筋）
QUAD(R)
QUAD(L)
ADD(R)
ADD(L)
ABD(R)
OBL(R)
HAM(R)
HAM(L)
L4(R)
L1(R)
Th7
0
1
2
3

参考文献

[1]厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部：身体障害児・者実態調査結果（平成１３年６月１日調査）平成１４年８月
[2],[5]岡崎：電動車椅子の利用が身体障害者におよぼす影響について、広島理学療法学、第 9 号、2000
[3]藤井、和田：乗り手にやさしい電動車椅子の実現に関する研究、日本機械学会論文集（C 編）、66 巻、645 号、pp229-235
[4]日本機械学会誌：ホームケアテクノロジー－健康長寿社会を目指して－、1998 年 1 月号
[6]王碩玉：健康増進機能を有する全方向移動可能な電動車椅子、第１７回日本ロボット学会学術講演会、pp13-14
[7]太田恵美子：乗馬療法、畜産の研究、第５１巻、第１号、pp148-154
[8]木村哲彦：生馬シミュレータの開発、医療、第４０巻、第８号、pp749-755
[9]四宮、関根、仲島他：乗馬療法機器の開発と筋力トレーニング効果の検証、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、別刷、pp197-202
[10] 真保吾一：初学者のための機械の要素[第 2 版]、理工学社
[11]進士、橋本、泉他：磁気ねじをもちいた機構の起動時の特性と位置決め精度、日本機械学会論文集（C 編）、６４巻、６２５号、pp389-395
[12]江上、神倉、菅野他：小型 ER ロータリダンパの試作とその制御実験、日本機械学会論文集（C 編）、64 巻、628 号、pp124-129
[13]藤岡、井口、織田：弾性支持ばり電車線－パンタグラフ系の動力学的研究、日本機械学会論文集（C 編）、49 巻、439 号、pp392-400
[14]長屋、武田、平井他：間欠動荷重を受けるたわみ形多板クラッチの伝達トルクの解析、日本機械学会論文集（C 編）、49 巻、440 号、pp685-693
[15] [20]John.J.Craig：ロボティクス　機構・力学・制御、共立出版株式会社、1995
[16]下嶋、佐藤：ロボット工学、森北出版株式会社、1999
[17]吉原：モノグラフ１１空間図形、科学新興社、1988
[18] [19]吉川恒夫：ロボット制御基礎論、コロナ社、2001 年
[21],[24],[25],[26],[27]：土谷武士・江上正共著：現代制御工学、産業図書
[22] 小林一行：MATLAB ハンドブック、株式会社秀和システム
[23] 土谷武士・江上正共著：基礎システム制御工学、森北出版株式会社、2001
[28]山田茂、福永哲夫編著：骨格筋　運動による機能と形態の変化、有限会社ナップ、1997

謝辞

本論文は筆者が高知工科大学大学院博士課程前期において行った研究である．
本研究を行うにあたり，ご指導を下さった高知工科大学知能機械システム工学科王碩玉教授，松下電工株式会社四宮葉一氏，小澤尚久氏に深く感謝致します．

また，実験やシミュレーションに関して指導を下さった，高知工科大学大学院博士課程陳貴林氏，溝渕宣誠氏，修士課程伊藤淳氏，菅野正人氏，野村和寿氏，浜口和洋氏に深く感謝致します．

そして，実験の手伝いなどをしてくださった知能ロボティクス研究室の皆さんに深く感謝致します．

最後に，大学，大学院と学生生活を支えてくれた両親，弟に感謝致します．

２００３年1月３０日