

〈研究ノート〉Hammond B-3 発音原理のモデル化 (1)

OHSIMA, Yoshiaki / 大嶋, 良明

(出版者 / Publisher)

法政大学国際文化学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Journal of Intercultural Communication / 異文化. 論文編

(巻 / Volume)

20

(開始ページ / Start Page)

209

(終了ページ / End Page)

218

(発行年 / Year)

2019-04-01

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00021677>

Hammond B-3 発音原理のモデル化 (1)

Modeling Operating Principles of the Hammond Organ B-3 (1)

大嶋良明
OHSHIMA Yoshiaki

1. はじめに

電子楽器としてのハモンド・オルガンは電気時計の技師で事業家でもあった Laurens Hammond によって 1934 年に発明されまずアメリカ国内にて、その後はヨーロッパにおいて教会音楽の演奏やポピュラー音楽の世界で普及した。教会オルガンが多数のパイプを吹鳴することで演奏されるのに対し、Hammond はトーン・ホイール (Tone Wheel) と呼ばれる独自の音源機構により、教会オルガンに類似した音色を 5 オクターブ 61 鍵の二段鍵盤と 2 オクターブ 25 鍵の足鍵盤により制御される電子回路より発生させることを考案し、これを小さな教会や劇場の舞台でも演奏可能な可搬的な楽器として商品化した。なかでも 1954 年に発表されたモデル B-3 は生産台数も多くハモンド・オルガンの代表的な機種としてよく知られている。B-3 は 1974 年に製造が中止されたが、その独特な音色が愛好されており今日でも世界的に人気が高い。しかしながら現存する個体はいずれも製造後長い年月を経たいわゆるビンテージ楽器であり、保守部品の入手困難と楽器そのものの機構的な複雑さのために保存状態の良いものは少なくなりつつある。

サンプリング音源による音楽制作が普及した今日では、様々な電子楽器が DTM ソフトウェアのプラグイン音源として提供されることが一般的となったが Hammond B-3 もまたその例外ではない。身近な例では Apple Logic Pro X には B-3 音源が内蔵され、実機に触れる機会の少ない今日のユーザのために音作りの原理が詳しく説明されている。一方で鍵盤楽器としての忠実な造り込みや演奏性を重視する演奏家のためには、Hammond の商標権を取得した鈴木楽器製作所からデジタルシミュレーション音源による後継機種 B-3mkII が製造販売されている。

スタンドアロンの PC ソフトウェアとしては Windows や LINUX 環境において Csound や C 言語でのいくつかの実現例があるが、実装した機能に取捨選択があり、モデル化の手法にも長所短所がある。そこで本研究では Hammond B-3 の機構原理に基づく音源のモデル化と基本的な機能のソフトウェアによる実装を試みた。そこでは B-3 各部を検証するプラットフォームとしての利便性と機能追加や改修の容易さを考慮した。特にプログラム全体の処理の効率よりも実機的设计思想と信号の流れを可視化することに注力し、プログラミング環境 Pure Data を採用した。

2. 構成原理のモデル化

図 1a および図 1b に全体の構成図を示す。Hammond B-3 の音源には機構的な制約に起因するいくつかの特徴があり、以下にモデル化の要点をまとめ、各機能の実装の有無を報告する。

トーン・ホイール:

ハモンド・オルガンの音源波形はほぼ正弦波状である。この音源波形は、60Hz の同期モーターが駆動する毎分 1200 回転の歯車機構を減速した末端にある真鍮製歯車の回転を電磁的ピックアップで読み取ることで生成される。これらの歯車をトーン・ホイールと呼ぶが、Hammond B-3 には 91 個のトーン・ホイールが内蔵されている。歯車機構は発生する音程により C、C $\sharp$ 、D、D $\sharp$ 、E、F、F $\sharp$ 、G、G $\sharp$ 、A、A $\sharp$ 、B の 12 組の shaft と呼ばれる部分機構から構成され、個々の shaft は 7 個または 8 個の倍音系列を発生させる。隣り合う鍵盤も含めて音名の異なる全ての鍵盤は異なる shaft により発音され、オクターブ関係にある鍵盤群は同じ shaft から発音される。

表 1a および表 1b に鍵盤上の 61 鍵と発音するトーン・ホイールの倍音系列との関係を示す。また表 2 には同じく足鍵盤についての対応関係を示す。図中の網がけ部分は後述する fold back が行われる範囲である。本研究では shaft を基本単位として、91 個の正弦波オシレータを駆動するための所定の周波数を shaft ごとに算出している。

Shaft Architecture:

音源周波数を決めるトーン・ホイールの回転数は駆動・被駆動歯車の歯車比によって決められるが、それらは整数対整数の比で表される近似値となる。実際には A 音を受け持つ shaft が A4=440Hz と正確な音程となるものの、他の shaft にはわずかな音程上の誤差が存在する。また最高音部の 7 音は F shaft が C7 音を発音し、順に進んで B shaft が F $\sharp$ 7 音¹というように、それぞれ 5 度下の shaft から発音するため、他の鍵盤位置の同音とは厳密なオクターブ関係になっていない。また C shaft から E shaft においては最高倍音のトーン・ホイールには歯車がなくダミーとなっている。本研究ではこのような shaft の機構的な特徴を実装している。さらにそれぞれの shaft の減速比を外部パラメータとして指定することで、例えば原理発明当時の特許文献（いわゆる Patent Organ）による減速比による発音や 12 音平均律による発音などを可能とした。図 2 に A shaft の実装を示す。図 3 にこれに接続するトーン・ホイールの構造を示す。

Fold back:

音色合成に必要なすべての倍音系列を含む歯車機構は楽器筐体に収納しきれないため鍵盤上のかなりの位置で fold back と呼ばれるトーン・ホイールの代用（借用）が行われ

1 製造当時の歯切り盤（Hobbing Machine）の加工性能を上回る歯数になったためと推測されている。

る。すなわち不足する高い音を1オクターブ下のトーン・ホイールから、不足する低い音を1オクターブ上のトーン・ホイールから代用する。Fold backは16'、2-2/3'、2'、1-3/5'、1-1/3'、1'の系列で必要となり、このうち1-1/3'、1'の系列では2回のfold backが起こる。

本研究ではMIDI楽器としての演奏性と61鍵の鍵盤機構、91個のトーン・ホイールによる設計上の内部諸元をMIDIノートナンバーから35を減じることで鍵盤番号を、これに12を加えることで8'基音に該当するトーン・ホイール番号を得ているが先に述べた倍音系列が必要とするトーン・ホイール番号が12以下となる場合と92以上となる場合には繰り返しfold backの原理を適用するように実装した。

ドローバーとプリセット・キー：

B-3の音色は基音（8'）を含めて9個の倍音系列（16'、5-1/3'、8'、4'、2-2/3'、2'、1-3/5'、1-1/3'、1'）を混合する、いわゆる加算合成方式によるものである。倍音系列の混合量は、各種音色が固定的に事前設定されたプリセット・キー²の選択もしくは各鍵盤2組のドローバーで倍音の混合量を任意に設定することで実現する。このうち16'、8'、4'、2'、1'は基音とオクターブ関係にある倍音系列であり、5-1/3'、2-2/3'、1-3/5'は5度、1-1/3'は3度の系列である。実機での倍音系列の混合は出力ミキサーとなるトランスの巻線比を変えることによって実現しており、ドローバーの目盛り（0~8）の増分1が信号ゲイン3dBとなる設計である。本研究ではトランスをモデル化することは避け、無歪みで磁気結合したインピーダンス変換器と見なすことで9本の信号バスをミキサーで加算混合する構成とした。図4にドローバー機能の実装を示す。また表3にプリセット・キーと等価ドローバー設定値との関係を示す。

パーカッション：

パーカッション効果は信号バスとは別個に第2倍音、第3倍音成分をブーストしたものを短い減衰時間で音量変化させたものを第8倍音でキーイングすることで実現する。この効果はB音プリセット・キーに対応する右側のドローバーが選択された時にのみ有効となるが、現時点では未実装である。

キー・クリック：

打鍵時に聞かれる独特のクリック音については、鍵盤押下のタイミングでの音源波形の位相と同時開閉するはずの9個のスイッチ接点を実際に導通するタイミングがばらつくことの影響であろうと推測される。これは音楽的に設計された楽器としての特徴ではなく、発音原理と偶発的な回路現象による音色上の特徴であるため、現時点では実装せずモデル化の最終段階で検討する。

2 鍵盤左端部にある黒白反転したキー。音色切替えのためのスイッチでありオルガン鍵盤ではない。

ビブラート / コーラス回路 :

B-3 には 16 段の LC ラダー型遅延回路、いわゆる Tapped Delay Line の段間の端子を回転式摺動接点（スキャナー）により周期的に順次切り替えるビブラート・コーラス機能（スキャナー・ビブラート）が内蔵されている。ビブラートの音程の揺れは信号を読み出す端子での遅延時間により実現する。すなわち遅延時間が順に長くなるときには音程が下がり、遅延時間が順に短くなるときには音程が上昇する。回転摺動接点に接続する遅延回路の端子は左右対称に接続されており、回転の前半で音程が下降し後半で音程が上昇する効果が周期的に繰り返される。

ビブラートの揺れの周期は約 7Hz と固定値であり、スキャナーの回転数が 412rpm であることで決定される。コーラス効果の切り替えは遅延回路を通るエフェクト音に原音を混合することで実現する。またエフェクトの深さは 3 種類切り替えられるが、これは 3 種類の最大遅延時間に向けて信号を読み出す端子の組み合わせを切り替えることにより実現している。

ビブラート回路については本研究でのモデル化を試みたが、インダクタの回路定数など不明箇所が残っており、現時点では構成原理の中でスキャナーに着目した遅延回路による近似的な試作の域にとどめた。

3. おわりに

Hammond B-3 の機構原理に基づくモデル化の要点をまとめ、Pure Data による実装を報告した。今後は足鍵盤やパーカッションなど未実装の機能を追加し、ビブラート回路の解析などさらに詳細なモデル化に向けて検討を続ける予定である。

参考資料

- [1] “Service Manual-models: A, A-100, AB, BA, BC, BCV, BV, B2, B3, C, CV, C2, C-2G, C3, D, DV, D-100, E, G, GV, RT, RT-2, RT-3”, Tech Rep H000-000495, Nov 1987.
- [2] Hammond, L., Electrical Musical Instrument, US Patent #1,956,350, 1934.
- [3] Vail, M., The Hammond Organ: Beauty in the B, Backbeat Books, 2002.
- [4] Puckette, M., The Theory and Technique of Electronic Music, World Scientific Publishing, 2007.
- [5] Boulanger, R., The Csound Book: Perspectives in Software Synthesis, Sound Design, Signal Processing, and Programming, MIT Press, 2000.

表 1a 各鍵盤の音源倍音系列とトーン・ホイール番号の関係 (1 ~ 36 番鍵)

鍵盤	音名	トーン・ホイール番号								
		16'	5-1/3'	8'	4'	2-2/3'	2'	1-3/5'	1-1/3'	1'
1	C	13	20	13	25	32	37	41	44	49
2	C#	14	21	14	26	33	38	42	45	50
3	D	15	22	15	27	34	39	43	46	51
4	D#	16	23	16	28	35	40	44	47	52
5	E	17	24	17	29	36	41	45	48	53
6	F	18	25	18	30	37	42	46	49	54
7	F#	19	26	19	31	38	43	47	50	55
8	G	20	27	20	32	39	44	48	51	56
9	G#	21	28	21	33	40	45	49	52	57
10	A	22	29	22	34	41	46	50	53	58
11	A#	23	30	23	35	42	47	51	54	59
12	B	24	31	24	36	43	48	52	55	60
13	C	13	32	25	37	44	49	53	56	61
14	C#	14	33	26	38	45	50	54	57	62
15	D	15	34	27	39	46	51	55	58	63
16	D#	16	35	28	40	47	52	56	59	64
17	E	17	36	29	41	48	53	57	60	65
18	F	18	37	30	42	49	54	58	61	66
19	F#	19	38	31	43	50	55	59	62	67
20	G	20	39	32	44	51	56	60	63	68
21	G#	21	40	33	45	52	57	61	64	69
22	A	22	41	34	46	53	58	62	65	70
23	A#	23	42	35	47	54	59	63	66	71
24	B	24	43	36	48	55	60	64	67	72
25	C	25	44	37	49	56	61	65	68	73
26	C#	26	45	38	50	57	62	66	69	74
27	D	27	46	39	51	58	63	67	70	75
28	D#	28	47	40	52	59	64	68	71	76
29	E	29	48	41	53	60	65	69	72	77
30	F	30	49	42	54	61	66	70	73	78
31	F#	31	50	43	55	62	67	71	74	79
32	G	32	51	44	56	63	68	72	75	80
33	G#	33	52	45	57	64	69	73	76	81
34	A	34	53	46	58	65	70	74	77	82
35	A#	35	54	47	59	66	71	75	78	83
36	B	36	55	48	60	67	72	76	79	84

表 1b 各鍵盤の音源倍音系列とトーン・ホイール番号の関係 (37 ~ 61 番鍵)

鍵盤	音名	トーン・ホイール番号								
		16'	5-1/3'	8'	4'	2-2/3'	2'	1-3/5'	1-1/3'	1'
37	C	37	56	49	61	68	73	77	80	85
38	C#	38	57	50	62	69	74	78	81	86
39	D	39	58	51	63	70	75	79	82	87
40	D#	40	59	52	64	71	76	80	83	88
41	E	41	60	53	65	72	77	81	84	89
42	F	42	61	54	66	73	78	82	85	90
43	F#	43	62	55	67	74	79	83	86	91
44	G	44	63	56	68	75	80	84	87	80
45	G#	45	64	57	69	76	81	85	88	81
46	A	46	65	58	70	77	82	86	89	82
47	A#	47	66	59	71	78	83	87	90	83
48	B	48	67	60	72	79	84	88	91	84
49	C	49	68	61	73	80	85	89	80	85
50	C#	50	69	62	74	81	86	90	81	86
51	D	51	70	63	75	82	87	91	82	87
52	D#	52	71	64	76	83	88	80	83	88
53	E	53	72	65	77	84	89	81	84	89
54	F	54	73	66	78	85	90	82	85	90
55	F#	55	74	67	79	86	91	83	86	91
56	G	56	75	68	80	87	80	84	87	80
57	G#	57	76	69	81	88	81	85	88	81
58	A	58	77	70	82	89	82	86	89	82
59	A#	59	78	71	83	90	83	87	90	83
60	B	60	79	72	84	91	84	88	91	84
61	C	61	80	73	85	80	85	89	80	85

表 2 各足鍵盤の音源倍音系列とトーン・ホイール番号の関係

足鍵盤	音名	トーン・ホイール番号							
		16'	5-1/3'	8'	4'	2-2/3'	2'	1-3/5'	1-1/3'
1	C	1	13	13	25	32	37	41	44
2	C#	2	14	14	26	33	38	42	45
3	D	3	15	15	27	34	39	43	46
4	D#	4	16	16	28	35	40	44	47
5	E	5	17	17	29	36	41	45	48
6	F	6	18	18	30	37	42	46	49
7	F#	7	19	19	31	38	43	47	50
8	G	8	—	20	32	39	44	48	51
9	G#	9	—	21	33	40	45	49	52
10	A	10	—	22	34	41	46	50	53
11	A#	11	—	23	35	42	47	51	54
12	B	12	—	24	36	43	48	52	55
13	C	13	32	25	37	44	49	53	56
14	C#	14	33	26	38	45	50	54	57
15	D	15	34	27	39	46	51	55	58
16	D#	16	35	28	40	47	52	56	59
17	E	17	36	29	41	48	53	57	60
18	F	18	37	30	42	49	54	58	61
19	F#	19	38	31	43	50	55	59	62
20	G	20	39	32	44	51	56	60	63
21	G#	21	40	33	45	52	57	61	64
22	A	22	41	34	46	53	58	62	65
23	A#	23	42	35	47	54	59	63	66
24	B	24	43	36	48	55	60	64	67
25	C	25	44	37	49	56	61	65	68

表3 プリセット・キーと等価ドローバー設定値

キー	上段 音色名称	設定値	キー	下段 音色名称	設定値
C	キャンセル	該当なし	C	キャンセル	該当なし
C#	Stopped Flute (pp)	00-5320-000	C#	Cello (mp)	00-4545-440
D	Dulciana (ppp)	00-4432-000	D	Flute & String (mp)	00-4423-220
D#	French Horn (mf)	00-8740-000	D#	Clarinet (mf)	00-7343-430
E	Salicional (pp)	00-4544-222	E	Diapason, Gamba & Flute (mf)	00-4544-220
F	Flutes 8' & 4' (p)	00-5403-000	F	Great, no Reeds (f)	00-6644-322
F#	Oboe Horn (mf)	00-4675-300	F#	Open Diapason (f)	00-5642-200
G	Swell Diapason (mf)	00-5644-320	G	Full Great (ff)	00-6845-433
G#	Trumpet (f)	00-6876-540	G#	Tibia Clausa (f)	00-8030-000
A	Full Swell (ff)	32-7645-222	A	Full Great with 16' (fff)	42-7866-244
A#	ドローバー 1	可変	A#	ドローバー 1	可変
B	ドローバー 2	可変	B	ドローバー 2	可変

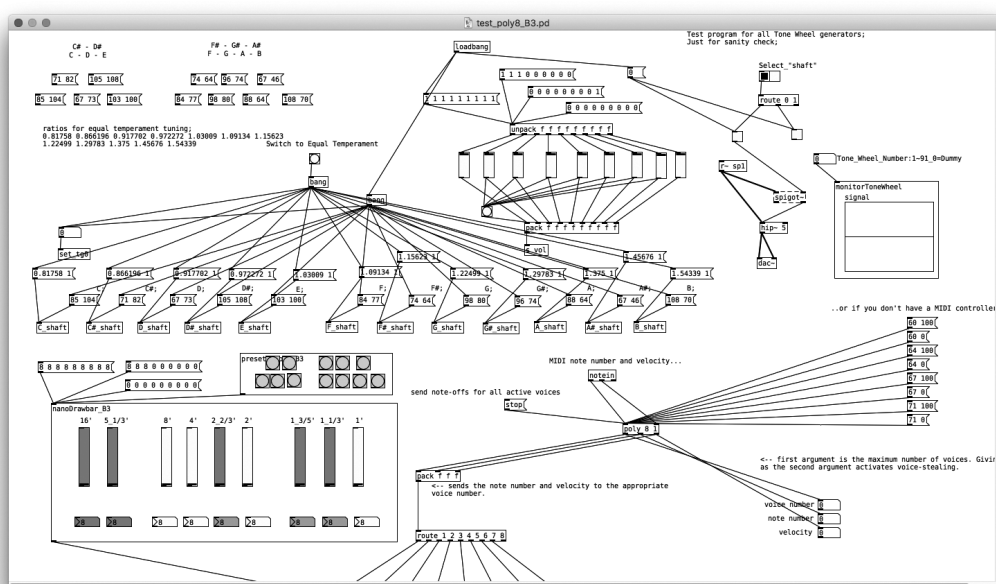


図1a 全体の構成図 (Part 1)

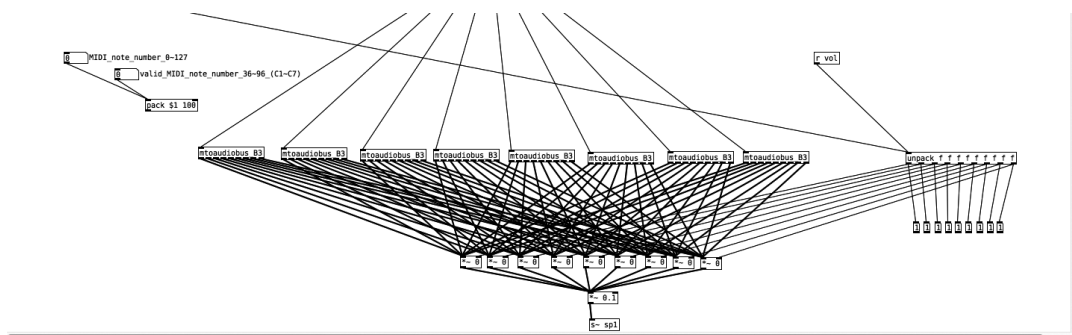


図 1b 全体の構成図 (Part 2)

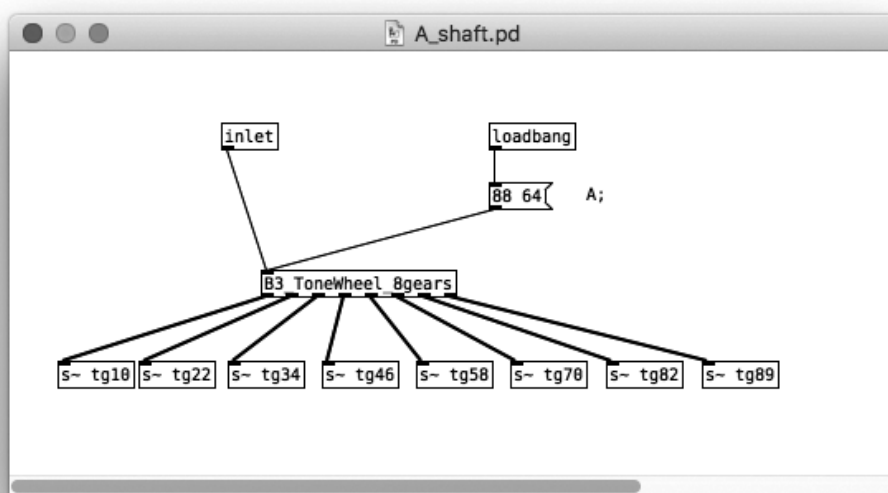


図 2 A shaft の構造

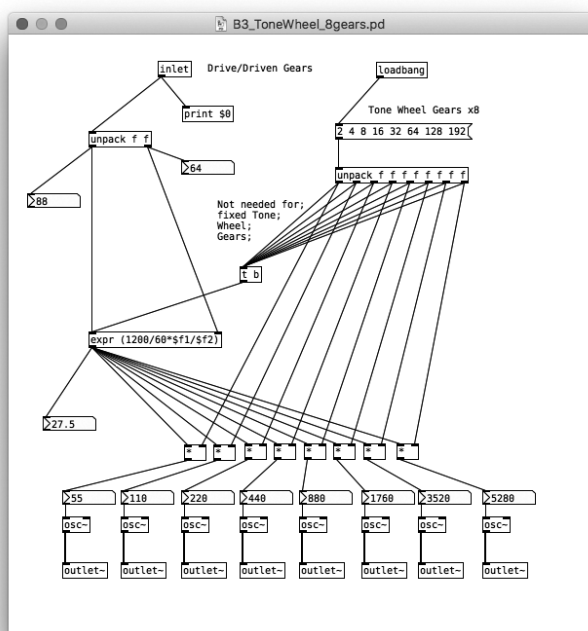


図3 トーン・ホイールの構造

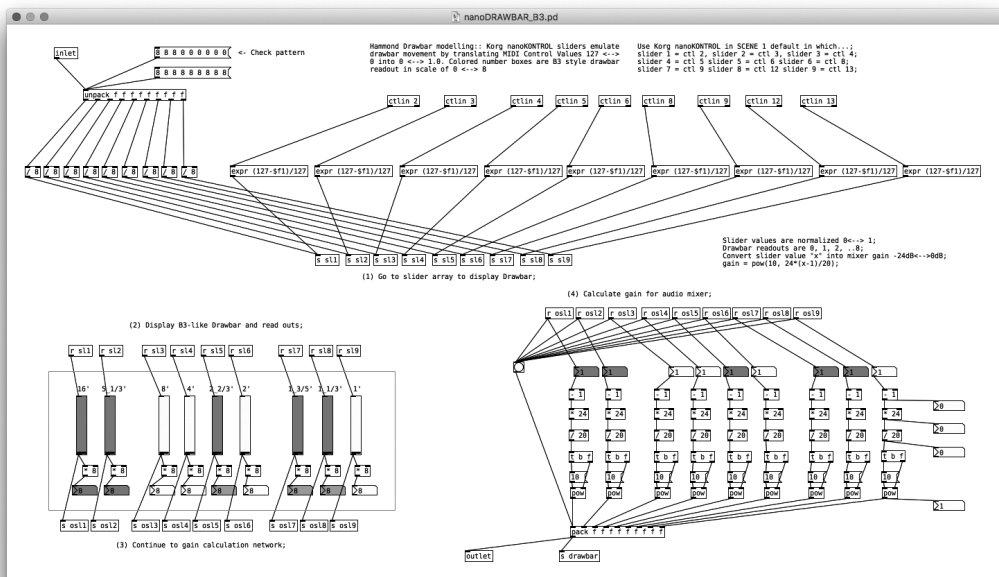


図4 ドローバー機能の実装