

BIBLIOTECA MUSEO
DI SCIENZA DELLA SCIENZA
FIRENZE

Misc
617
49

BIBLIOTECA

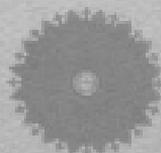
MARK ELLING ROSHEIM

L'automa programmabile di Leonardo

XL

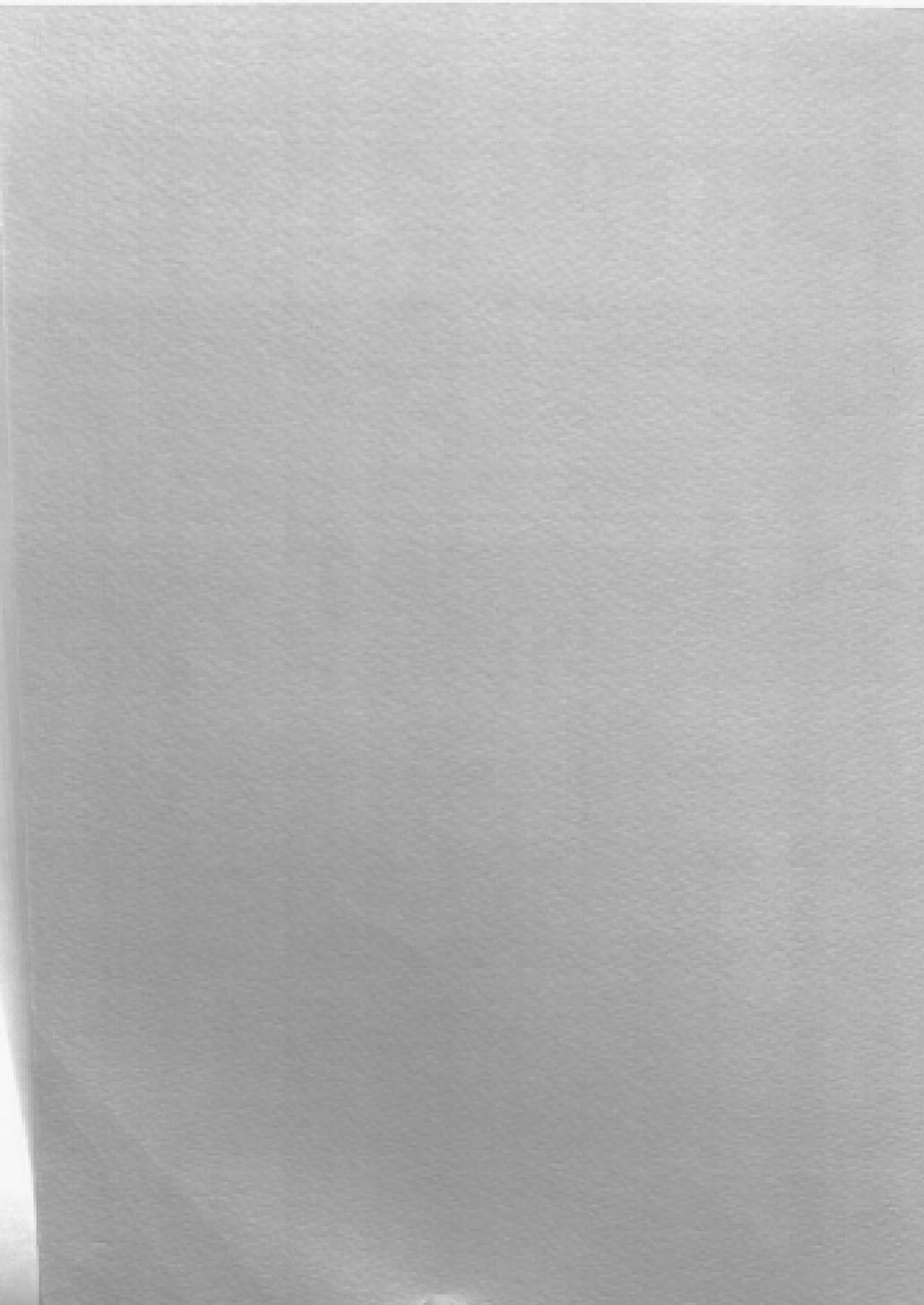
LETTURA VINCIANA

15 aprile 2000



CITTÀ DI VINCI
Biblioteca Leonardiana


GIUNTI



XL LETTURA VINCIANA

MARK ELLING ROSHEIM

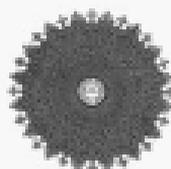
L'automa programmabile di Leonardo

(Codice Atlantico, f. 302 r, ex 296 v-a)

XL

LETTURA VINCIANA

15 aprile 2000



CITTÀ DI VINCI
Biblioteca Leonardiana



COMUNE DI VINCI



BIBLIOTECA COMUNALE LEONARDIANA

Centro di ricerca e documentazione per gli studi leonardiani

Via G. La Pira, 1 - 50019 Vinci (Firenze) Italia

Tel. (0574) 371 130001 / (0574) 371 370004

<http://www.comune.vinci.fi.it/vinci/home.htm>

libbia.leonardiana@comune.vinci.fi.it

*Traduzione dall'inglese di
Alexandra Asceri Martin*

ISBN 88-09-02181-9

Per il testo e le illustrazioni
Copyright © 2001 Mark Elling Rodheim
TUTTI I DIRITTI RISERVATI

Per la presente edizione
© 2001 Giunti Gruppo Editoriale, Firenze
Biblioteca Comunale Leonardiana, Vinci

PREMESSE STORICHE

IL PROGRAMMA delle "Letture vinciane", si sa, richiede che si scelga un testo di Leonardo per fime il tema di un'analisi critica o di una interpretazione. D'altra parte, il disegno, per Leonardo, è il mezzo di comunicazione per eccellenza, superiore quindi alla parola. Basti ricordare quanto egli stesso afferma in una celebre nota del 1513 posta accanto a un grande disegno del cuore rappresentato nel suo contesto di vene e arterie:

O scimbre, con quali lettere scriverai tu con tal perfezione la intera figurazione, qual fa qui il disegno?

E così è del tutto giustificato che una Lettura possa applicarsi a un disegno come quello del Codice Atlantico¹, f. 812 r [296 v-a], nel quale si assiste al formarsi di un'idea tecnologica che risale addirittura al 1478 circa, quando Leonardo aveva ventisei anni. Questo disegno, nel quale non appare una singola parola, può essere ora "letto", come intendo fare, per quello che ritengo rappresenti: un carrello programmabile per automi. Come tale, infatti, avrebbe avuto un effetto determinante sulle teorie biomeccaniche di Leonardo, fino alle ultime applicazioni e scoperte, come il famoso e ancora enigmatico leone meccanico di quasi quarant'anni dopo.

Lo studio da me condotto prende l'avvio dall'immissione fondamentale di Carlo Pedretti, che ha per primo riconosciuto, nel 1973, nella cosiddetta "automobile di Leonardo" del Codice Atlantico, un carrello per automi², dotato persino di trazione anteriore e di comando a pignone e cremagliera!

¹ Windsor, RL 1907 r (C II r 6), 1513 circa. Più in basso, nello stesso foglio, Leonardo scrive: "Con quali lettere descriverai questo core che tu non empia un libro?". Per entrambe le citazioni, vedi *Scritti scelti di Leonardo da Vinci*, a cura di Anna Maria Brizio, Torino, 1952, p. 308.

² D'ora in poi citato anche come CA.

³ Carlo Pedretti, "Eccoci: perché la missione si fiede": (*Codice Atlantico*, fol. 247 verso), *XV Lettura Vinciana*, Vinci, Biblioteca Leonardiana, 13 aprile 1973, Firenze, 1975, p. 23, nota 9, in cui la cosiddetta "automobile", rappresentata al CA, f. 812 r [296 v-a], viene descritta nel seguente modo: "non era altro che un carro per fante azionato da molle e destinato a percorre-

Il professor Pedretti ha ripreso la sua ricerca in occasione di questa Lettera, fornendomi numerosi consigli e suggerimenti, e di questo gli sono molto grato.

Leonardo dedicò una parte delle sue ricerche allo sviluppo di automi mobili; automi destinati a diventare nei secoli seguenti, soprattutto nel sedicesimo e diciassettesimo secolo, di uso comune in feste popolari e di corte.

Nel 1478, mentre si trovava sotto la protezione dei Medici, Leonardo progettò un carrello programmabile per automi comandato da un "computer". Questo carrello può essere considerato un precursore degli automi mobili e forse addirittura il primo "computer", appunto, mai realizzato nella civiltà occidentale.

La rilettura dei codici di Leonardo, affiancata dall'analisi dei lavori di un artigiano giapponese del diciottesimo secolo, mi ha permesso di ricostruire le intenzioni dello stesso Leonardo per quanto riguarda il carrello per automi. Inoltre, l'esame delle opere di Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) mi ha aiutato nell'interpretazione dei concetti espressi da Leonardo nel primo dei manoscritti di Madrid. Infine, ho esaminato copie anonime dei suoi disegni tecnologici.

L'idea di fondo del carrello programmabile fu forse reimpiegata da Leonardo, circa trentasei anni più tardi, per il leone meccanico ricostruito nel 1515 in Francia, nuovamente su commissione dei Medici. In una cronaca del 1584 rappresentante l'allegoria dell'amicizia tra i Medici e Francesco I, in occasione dell'accesso di quest'ultimo al trono di re di Francia, Giovan Paolo Lomazzo racconta che "una volta dinanzi a Francesco I Re di Francia [Leonardo] fece camminare da sua posta in una sala, un Leone, fatto con mirabile artificio, e do poi fermare aprendosi il petto, tutto ripieno di gigli e diversi fiori". L'occasione per la presentazione del leone fu l'ingresso trionfale di Francesco I a Lione: il leone era infatti il vecchio simbolo di Firenze, mentre i gigli stavano a significare i *fleur de lis* offerti da Luigi XI alla stessa città di Firenze come segno di amicizia. Un'unica fantastica macchina li riuniva quindi entrambi simbolicamente in una presentazione drammatica.

L'interpretazione di questo avvenimento è stata fornita da Carlo Pedretti solo di recente. Michelangelo Buonarroti il Giovane, nipote del grande rivale di Leonardo, nella descrizione delle nozze di Maria de' Medici, regina di Francia e di Navarra, un opuscolo pubblicato a Firenze nel 1600, menziona un automa presentato nel corso di un banchetto, un leone meccanico il quale, dopo aver mosso alcuni passi, si alzava sulle zampe posteriori e apriva quelle anteriori sul petto pieno di *fleur de lis*. "un concerto", conclude il Buonarroti, "simile a quello, il quale Lionardo da Vinci nella città di Lione nella venuta del Re Francesco, mise in opera per la nazione fiorentina".

ove brevi tagli come da un punto all'altro di una piazza". In Carlo Pedretti, *Leonardo architetto* (Milano, 1978), p. 319-321, questa interpretazione viene elaborata più dettagliatamente e i disegni di Leonardo vengono messi a confronto con altri simili giovanili del Codice Atlantico e degli Uffizi.

*Non è rimasto nulla dei progetti di Leonardo per il leone meccanico; le uniche notizie, risalenti al Lomazzo e al Vasari, non fornivano dettagli sull'occasione per la quale era stato

Il leone meccanico presentato a Lione fu preceduto, nelle opere di Leonardo, dal carrello programmabile oggetto di questa Lettera e dal cavaliere meccanico, oltre che da ricostruzioni di automi antichi. Il cavaliere meccanico, in particolare, rientra nella tradizione di disegni meccanici della bottega del Verrocchio. Come riporta il Vasari, Verrocchio aveva progettato un orologio meccanico per la piazza del Mercato Nuovo a Firenze, uno strumento, dice lo stesso Vasari, che fu "tenuto in que' tempi cosa molto bella e capricciosa"¹. Si può dedurre che Leonardo avesse voluto seguire, e forse persino superare, il suo maestro.

Il suo primo automa, il carrello programmabile qui ricostruito, fu progettato nel 1478 circa e aveva la forma di tripode su ruote. Leonardo sembra aver dato l'interpretazione letterale di una stampa dal diciottesimo libro dell'*Iliade* (850 a.C. circa), nella quale si descrive un gruppo di automi nella casa di Efesto:

...venti tripodi in una volta faceva,
da collocare intorno alle pareti della sala ben costruita;
ruote d'oro poneva sotto ciascun piedistallo,
perché da soli entrassero nell'assemblea divina,
poi tornassero a casa, meraviglia a vederli².

I disegni di Leonardo possono far presumere che egli avesse voluto procedere ad una ricostruzione il più possibile fedele dell'automa descritto in questa stanza; in particolare, il supporto a tripode è richiamato dalla tre ruote di Leonardo; forse le tre ruote d'oro di Omere. Il riferimento al movimento e comando indipendente dei tripodi ("perché da soli entrassero") e la descrizione della loro funzione ("nell'assemblea divina, poi tornassero a casa, meraviglia a vederli") implicano che, oltre a potersi muovere autonomamente, i tripodi potessero anche seguire, seppure in maniera rudimentale, un percorso programmato. In conclusione, la descrizione dei tripodi nell'*Iliade* rispecchia quella che Giovan Paolo Lomazzo fa del leone meccanico di Leonardo.

Quest'ultimo ritornò ancora sul tema degli automi antichi con il progetto

impiegato. Per questo e altre informazioni si rimanda a *Descrizione delle felicitose nozze della Cristianissima Maestà di Madama Maria Medici Regina di Francia e di Navarra*, di Michelangelo Buonarroti il Giovane (Firenze, 1600), p. 10, presentato e commentato per la prima volta da Carlo Pedretti nel suo *Leonardo Architetto*, op. cit. (nota 1), p. 321. Vedi anche, dello stesso autore: "Leonardo at Lyons", in *Raccolta Pinacoteca*, XIX, 1966, p. 167-172, e *Leonardo. A Study in Chronology and Style*, London, 1971 (New York, 1983), p. 171.

¹Cfr. Carlo Pedretti, "Leonardo's Robot", in *Archivista Leonardiana*, X, 1967, p. 177-179, con citazione del Vasari (III, 172); Simona Cremante ha suggerito per prima una relazione tra questo ed il successivo progetto di Leonardo per un jocusman (Windsor, RL 12716 e RL 12688): "È unco di mano del medesimo [Verrocchio] il panto dell'orologio di Mercato Nuovo, che ha le braccia schiodate in modo che, alzandole, suona l'ora con un martello che tiene in mano: il che fu tenuto in que' tempi cosa molto bella e capricciosa".

²Omere, *Iliade*, XVIII, 171-176. La traduzione italiana è quella di Rosa Calabrochi Onesti (Torino, 1952, p. 661).

del jacquemart ad acqua, Windsor, RL 12688 e RL 12716, che risale al 1508 circa. Si tratta in questo caso di un automa idraulico, che poggia su una base cilindrica contenente dodici camere comunicanti; il riempimento in sequenza di queste camere provoca l'azionamento di valvole a galleggiante¹. L'automa era così in grado di far oscillare braccio e torso, colpendo la campana con una mazza. La posa e posizione del jacquemart danno l'impressione che questo si fosse appena avvicinato alla campana pronto a colpirla. La postura richiama la settima ode olimpica di Pindaro², nella quale vengono descritte alcune scene di vita nelle vie di Rodi e Creta:

Le strade recavano immagini
simili a vivi in cammino.
Ed era profonda la gloria. Mastria più mirabile
anche vien senza fiore a chi sa.
Tra gli uomini narrano antiche leggende...

Questa breve panoramica conferma l'interesse di Leonardo, nel periodo di esecuzione del disegno del carrello programmabile, per automi presentati in varie descrizioni. Tuttavia, né il Codice Atlantico, né i disegni degli Uffizi sono sufficienti da soli a chiarire esaurientemente le intenzioni di Leonardo per quanto riguarda il carrello: intenzioni che devono essere ricostruite reinterpretando anche altri materiali tratti dalla sua opera.

Partendo dall'interpretazione di Carlo Pedretti, secondo cui ci troviamo di fronte ad un carrello programmabile per automi, e non al prototipo non funzionante dell'automobile moderna, ho quindi rivolto la mia attenzione a disegni di automi eseguiti nei secoli successivi ed in altri paesi, al fine di elaborare la mia ipotesi del disegno e del funzionamento del carrello di Leonardo. Questa ipotesi ha quindi costituito la base per la reinterpretazione dei suoi frammenti originali: la mia idea di partenza era infatti che si potessero riconoscere tracce del carrello per automi disegnato da Leonardo sia in disegni successivi, sia nelle descrizioni di antichi automi: questi indizi dovrebbero coadiuvare l'interpretazione e la ricostruzione del disegno chiave di Leonardo, così come l'individuazione delle sue caratteristiche di funzionamento e applicazione. Allo stesso tempo mi sono avvalso, per quanto possibile, della mia esperienza e conoscenza di studioso appassionato della sua opera.

¹ In aggiunta al foglio incompleto del corpus di disegni di Windsor, ricostruito da Carlo Pedretti in base ai frammenti RL 12716 e RL 12688, il progetto del jacquemart è sopravvissuto in diversi frammenti del Codice Atlantico, ad esempio f. 63 v [a9 v-b], il quale è a sua volta riconducibile ai frammenti 12480 e 12708 della Royal Library, Windsor. Cf. *Leonardo da Vinci. Fragment at Windsor Castle from the Codice Atlantico*, edited by Carlo Pedretti, London, 1917, p. 38 e 41, e tavola 2. Vedi anche Mark E. Rosheim, "Leonardo's Lost Robot", in *Atahontia Leonardo Vinci*, IX, 1998, p. 90-110 (in particolare p. 100 e fig. 4).

² Si veda Pindaro, *Odi e frammenti*, traduzione e prefazione di Leone Tassaro, Firenze, Sansoni, 1961, p. 62.

Come dimostrerò, la reinterpretazione di fonti apparentemente non collegate tra di loro mi ha consentito di comprendere le intenzioni di Leonardo in relazione al funzionamento del carrello programmabile. Mi riferisco, in particolare, sia ad un automa giapponese, ma di probabile origine spagnola, usato nelle cerimonie del tè e risalente al diciottesimo secolo, sia all'opera di un seguace di Galileo, il *De motu automati* di Giovanni Alfonso Borelli, che si è rivelata utile per l'analisi delle ricerche di Leonardo nel primo codice di Madrid. Infine, l'ultima fonte della quale mi sono servito è costituita da una copia già del XVI secolo di disegni tecnologici dello stesso Leonardo.

1.1. *Portatore di tè giapponese del diciottesimo secolo*

Per poter capire meglio il disegno ed il funzionamento del carrello programmabile di Leonardo, ho esaminato un automa giapponese, o "Karakuri", della fine del diciottesimo secolo¹, usato come portatore di tè. Nel disegno, distante tre secoli e due continenti dal più antico carrello di Leonardo, ho potuto riconoscere un robot dotato di locomozione autonoma uguale per complessità, costruzione, materiali e funzionamento al leone meccanico di Leonardo che offriva fiori a Francesco I.

Il portatore di tè, alto 33,56 cm, è dotato di una struttura in legno di ciliegio, con ingranaggi composti di quercia lamellare e cetro giapponese, tenuta insieme da perni anch'essi di legno. Gli unici componenti metallici della struttura si trovano nel regolatore, il quale comanda una molla a spirale di finoni di balena ed è guidato da un sistema di camme programmabili montate sul coperchio della molla. La ruota anteriore steziante dell'automata è comandata tramite un rullo di punteria.

Per camma si intende un organo meccanico girevole, ad esempio una ruota, il cui profilo consente di impartire un moto preprogrammato ad un pezzo ad essa collegato. Modificando il profilo della camma si cambia "il programma", cioè il moto impartito al pezzo collegato. Avendo osservato le camme programmabili nell'automata giapponese, ho proceduto a riesaminare il carrello per automi di Leonardo, nel quale ho riconosciuto in effetti delle camme, di cui parleremo nel contesto della ricostruzione del carrello.

Dalla Spagna provengono altri disegni per automi, opera di Juanelo Torriano (circa 1522-1583), un maestro orologiaio al servizio di Carlo V. Progetti di questo tipo divennero particolarmente diffusi nel diciottesimo secolo, in concomitanza con lo sviluppo di grotte artificiali dotate di impianti idraulici e di portarivande con meccanismo a molla. Un automa di questo tipo, costruito in Giappone alla fine del diciottesimo secolo, costituisce un secondo indizio importante nella ricostruzione del carrello programmabile di Leonardo. Per di

¹ Per una discussione più dettagliata, cfr. Mark H. Rothem, *Robot Evolution. The Development of Automata*, New York, 1994, p. 27-32.

più, questo "Karakuri" o robot portatore di tè non è probabilmente un disegno originario del Giappone, ma piuttosto della Spagna, dove sono conservati i codici Madrid I e II fin dal loro trasferimento alla Biblioteca Reale, avvenuto nel 1642. La sezione mancante del primo manoscritto potrebbe ben aver contribuito a diffondere idee di Leonardo a noi oggi altrimenti sconosciute. Il disegno per l'automa portatore di tè potrebbe essere stato portato in Giappone, forse da missionari gesuiti spagnoli, nel corso del diciannovesimo secolo, e lì sarebbe stato reinterpretato, appunto, come portatore di tè.

I. 2. Carrello programmabile per automi nei codici di Madrid

Sebbene non vi siano più disegni completi di automi nel codice Madrid MS I, tuttavia in esso sono contenuti diversi esempi di possibili componenti per l'azionamento di automi, ad esempio comandi a molle compatti con originali meccanismi di fusi integrali. Anche se questi comandi sono apparentemente disegnati per orologi¹⁹, potrebbero benissimo essere stati impiegati per automi mobili, nei quali era necessario ottimizzare la dimensione ed il peso. Consistono di un cilindro al cui interno si trova una molla, gruppo spesso denominato barileto o tamburo. Il fuso montato sulla sommità del tamburo gira, compensando automaticamente la perdita di coppia provocata dallo svolgimento della molla. La potenza generata viene quindi trasferita, secondo diverse modalità, dal fuso girevole ad un albero motore fisso. Componenti di questo tipo potrebbero essere stati utilizzati in automi costruiti successivamente al carrello programmabile.

- 3 Il foglio 4 recto del codice Madrid MS I riproduce il primo esemplare di una serie di ingegnosi motori compatti e leggeri regolati da un fuso. Penni disposti a spirale collegano il tamburo al fuso; i penni si innestano a loro volta in una ruota cilindrica a penni, che trasferisce la rotazione del tamburo all'albero motore. Questo tipo di meccanismo consente la trasmissione di un numero maggiore di coppie su un sistema di cavi e catene convenzionali. Il progetto
- 4 rappresentato al Madrid I f. 16 r usa invece una ruota a penni conica per compensare la differenza tra la corsa del pignone e i penni del fuso. Il disegno Madrid
- 5 MS I f. 43 r, frequentemente riprodotto, se ruotato di 45 gradi, potrebbe essere interpretato come l'elemento motore di un automa. Il disco presente sull'albero motore sembra essere una ruota motrice. Tutti i disegni descritti rappresentano ingranaggi in cui Leonardo ha conseguito un aumento significativo del
- 6 rapporto di trasmissione, con evidenti vantaggi per la propulsione. Nel Madrid I f. 83 r sono illustrati diversi studi in cui vengono messe a confronto le qualità propulsive di vari tipi di molle. Nei disegni è visibile anche

¹⁹Vedi *The Clockwork Leonardo*, edited by Ludlun Reif, New York, 1974, ed in particolare il capitolo di Silvio A. Bedini e Ludlun Reif, "Horology", p. 149-163, con una sezione sui diversi tipi di molle alle p. 152-153.

una chiave a forma di "T", per dare la carica alle molle. Non è da escludere che una chiave simile venisse impiegata per caricare quelle del carrello per automi. Il profondo interesse di Leonardo per le molle è confermato dalle illustrazioni sulle loro tecniche di produzione, rappresentanti macchine per la produzione di fascette d'acciaio per molle.

Sono inoltre presenti diversi studi di ingranaggi, da quelli più semplici ed a basso costo in lamiera ad esempi complessi di forma elicoidale e con dentatura evolvente. Completano il quadro alcuni studi teorici sulla geometria degli ingranaggi. A partire da Madrid MS I f. o v e 24 r sono numerosissimi i disegni di camme di forme diverse. Leonardo sperimenta l'innesco tra camme e ruote a dentatura esterna e interna o mista, dando luogo a ingranaggi ibridi.

Non esistono però applicazioni pratiche di automi sofisticati, ad eccezione dell'orologio astronomico. È mia opinione che queste applicazioni siano contenute negli otto fogli (sedici pagine) rimossi dai codici di Madrid prima della pubblicazione; si tratta, come indicato dal Reti, dei fogli da 37 a 42 e da 35 a 36⁷¹.

7, 8

1.3. "De motu animalium" di Giovanni Alfonso Borelli

Giovanni Alfonso Borelli fu un matematico molto influente e anch'egli, come Leonardo prima di lui, sviluppò un interesse particolare per lo studio dei movimenti degli animali. Nato a Napoli il 28 gennaio 1608, da madre italiana e padre soldato di fanteria spagnolo, nel 1633, grazie ad una raccomandazione di Benedetto Castelli, Borelli ottenne la cattedra di matematica presso l'università di Messina in Sicilia, a quel tempo sotto la dominazione spagnola. Nel 1638 accettò l'incarico di professore di matematica all'università di Pisa. L'interesse per la scienza del movimento sembra essergli venuto dalla frequentazione di Marcello Malpighi. Nel 1671 circa, Borelli scrisse il "De motu animalium", nella speranza di essere ammesso alla Academie Royale de Science, da poco fondata a Parigi da Luigi XIV⁷².

Le somiglianze tra gli studi di Leonardo e quelli di Giovanni Alfonso Borelli non sono passate inosservate agli studiosi del nostro tempo. Zubov ritiene che Borelli abbia semplicemente "copiato" anche se ciò può essere vero in

⁷¹ Leonardo da Vinci, *The Madrid Codices. Volume III*, commentary by Ladislav Reti, New York, 1974, p. 25-28. Secondo Carlo Pedretti, *Leonardo architetto*, op. cit. (nota 3), p. 122, i fogli mancanti potrebbero benissimo aver contenuto "accurati e spettacolari studi del robot".

⁷² Il miglior riassunto dell'opera di Borelli, ed in particolare dei suoi studi innovativi sul volo degli uccelli, è a tutt'oggi quello di Giuseppe Boffino, *Il volo in Italia. Storia documentata e aneddotica dell'avvicinamento e dell'istituzione in Italia*, Firenze, 1921, p. 137-142 (con bibliografia completa). Vedi anche la prefazione all'edizione inglese, curata da Paul Maquet, di G.A. Borelli, *De motu animalium (On the Movement of Animals)*, Berlino, 1979, p. V-IX.

⁷³ V.P. Zubov, *Leonardo da Vinci*, Cambridge, Mass., 1968, p. 184-185.

alcuni casi, in altri dimostra una conoscenza estremamente avanzata per i suoi tempi, anticipatrice talvolta di ciò che la tecnologia non ha raggiunto, se non nel ventesimo secolo¹⁴. Zabeo lamenta inoltre l'assenza e l'incertezza delle teorie sul volo di Leonardo. Eppure, il codice di Madrid MS I dimostra come le teorie di quest'ultimo avessero consentito di disegnare, nel 1493, un deltaplano in grado di sollevare in volo un uomo, come dimostrato da recenti ricostruzioni¹⁵.

Solo pochi studiosi della produzione scientifica e tecnologica di Leonardo hanno richiamato l'attenzione sui possibili riflessi delle sue idee sull'opera di Borelli. Tra questi, nessuno si è mai domandato se queste idee gli fossero giunte per via diretta o tramite la mediazione di coloro che avevano avuto accesso ai manoscritti di Leonardo.

Com'è noto, questi furono riportati in Italia dalla Francia, dopo la sua morte nel 1519, dal suo allievo Francesco Melzi. È possibile naturalmente che vi fossero altri manoscritti in circolazione mentre Leonardo era ancora in vita; e sappiamo inoltre che, verso la fine del sedicesimo secolo, Federico Zaccaro esaminò, a Roma o a Torino, un manoscritto autografo di Leonardo contenente studi geometrici dei movimenti del corpo umano¹⁶ — un soggetto del quale Borelli si occupò estesamente. Poiché il leone meccanico per Francesco I era stato disegnato da Leonardo su commissione dei Medici, ed egli vi aveva lavorato, a Firenze o a Roma, nel 1513, è possibile che tutti gli studi preparatori per il progetto fossero stati raccolti in un manoscritto, lasciato in mano ai suoi protettori e quindi successivamente andato perduto; la stessa sorte sembra aver colpito il manoscritto di argomento ignoto consegnato da Leonardo a Messer Battista Dell'Aquila, "cameriere segreto del Papa"¹⁷.

L'invenzione di Leonardo di attrezzature da palombaro ed i suoi studi sui sottomarini furono presentati da Mario Baratta nel 1903 come parte di un vasto contesto storico che includeva gli studi di stesso argomento di Borelli¹⁸.

¹⁴ Paul Maquet (edited by), op. cit. (nota 12).

¹⁵ Vedi Michael Pidcock, "The Hang Glider", in *Achademia Leonardi Vinci*, VI, 1999, p. 220-231, con nota introduttiva e riproduzioni, alle figg. 1 e 2, delle fotografie realizzate durante il primo volo di prova del deltaplano (Sussex Downs, Inghilterra, 20 ottobre 1995). Una versione più fedele ai disegni di Leonardo è stata costruita recentemente a Sigillo, in Ungheria, dalla locale Associazione di piloti di deltaplano; vedi Carlo Pedretti, *Leonardo. Le macchine*, Firenze, 1999, p. 29.

¹⁶ Il resoconto di Federico Zaccari a proposito del manoscritto perduto di Leonardo, il Codice Huygens, contenente studi di cinetica, è riportato nel suo libro, *Torino, 1607*, p. 31; per una riproduzione ed una discussione completa, cfr. Leonardo da Vinci, *Libro di pittura*, *Codice Urbino lat. 1270 nella Biblioteca Apostolica Vaticana*, a cura di Carlo Pedretti, trascrizione critica di Carlo Vacca, Firenze, 1995, p. 42-43.

¹⁷ *Memoirs* di Leonardo al CA, I, 780r (187r-v), circa 1514-15, di solito citato, come fa J. P. Richter, con l'aggiunta della dicitura "de vacis", intepretata come titolo del libro del Vinci; si tratta, in realtà, della didascalia del diagramma adiacente. Si veda a tal proposito il *Commentary* di Carlo Pedretti all'antologia del Richter (Oxford, 1977), vol. I, p. 107.

¹⁸ Mario Baratta, *Castelli Italiani*, Torino, 1903, p. 179-184.

Gli studi di quest'ultimo sul volo degli uccelli furono menzionati per la prima volta da Gustavo Uzielli nel 1884, in relazione al Codice sul volo degli uccelli di Leonardo, in particolare per una nota al f. 7 r (ed ancora al f. 10 r) nella quale Leonardo, molto prima di Borelli, formula la teoria che il vento agisca da cuneo nel sollevamento in volo degli uccelli: "il vento fa ofidio di cuneo"¹⁷. Altri studiosi, quali Giuseppe Boffino nel 1919 e Raffaele Giacomelli nel 1933, affrontarono sistematicamente gli studi sul volo degli uccelli di Borelli e di Leonardo su base comparativa; e questo è anche l'argomento di un saggio pubblicato da G. Pezzi nel 1972¹⁸.

È quindi sorprendente che studiosi recenti come Martin Kemp (1982) Kenneth Keele (1983) e Kim H. Velman (1986), i quali hanno molto contribuito a riportare ad una giusta collocazione storica l'opera scientifica di Leonardo, non facciano alcun riferimento a Borelli. Eppure nell'edizione Keele-Pedretti del *Corpus degli studi anatomici di Leonardo a Windsor (1980)*¹⁹, Keele fa notare che il complesso meccanismo della lingua del picchio, di cui Leonardo intese scrivere²⁰, fu spiegato per la prima volta da Ulisse Aldrovandi e di nuovo da Lorenzo Bellini e da Borelli, che ne dà una bella illustrazione alla tavola V, figura 21²¹. Infine, Roberto Marcolongo dimostrò, nel 1939, che gli studi esesi ed innovativi di Leonardo sulla meccanica hanno un riflesso solo negli studi di Borelli, di due secoli successivi²². Questa interessante notazione non fu però sfortunatamente ripresa da Arturo Uccelli nella sua monumentale

¹⁷Gustavo Uzielli, *Riande inteso a Leonardo da Vinci. Serie seconda*, Roma, 1884, p. 403.

¹⁸L'importanza e l'originalità degli studi di Borelli sul volo degli uccelli furono riconosciute per la prima volta da E. J. Marey, *La machine animale*, Paris, 1873, e di nuovo dallo stesso autore, nel contesto di studi simili di Leonardo, in *Le vol des oiseaux*, Paris, 1890, p. 234-237, un contributo essenziale su questo argomento che non viene però citato nella *Bibliografia vinciana* a cura di Enrico Verga (1954). Vedi anche i seguenti contributi: Modestino del Casio, *Studi di Giovanni Alfonso Borelli sulla pesante atmosfera*, e dello stesso autore, *Giovanni Alfonso Borelli e la sua opera "De motu animalium"*, Napoli, 1908; Raffaele Cavoni, *Storia del metodo sperimentale in Italia*, Firenze, 1895-1906, 6 v., ed in particolare il vol. III, p. 408-409; Giuseppe Boffino, *Il volo in Italia. Storia documentata e anatomica dell'avvenimento e dell'aviazione in Italia*, op. cit. (nota 12), p. 137-142 (per un confronto con Leonardo); Raffaele Giacomelli, *Gli uccelli di Leonardo da Vinci nel volo*, Roma, 1933, p. 266-267 e, dello stesso autore, "Il De volatu di Borelli", in *L'Avvenire*, XIV, fasc. 3, 1934, p. 1-15. Per la teoria del vento come cuneo, sia in Leonardo che in Borelli, cfr. G. B. De Toni, *Le piante e gli animali in Leonardo da Vinci*, Bologna, 1922, p. 117. Vedi infine Giuseppe Pezzi, "La meccanica del volo nell'opera di Leonardo da Vinci e nel "De motu animalium" di Gian Alfonso Borelli", in *Minerva medica*, LXXIII, 1972, p. 2184-2188, e *Annali di medicina sociale e coloniale*, LXXVI, 1975, p. 1950-1954.

¹⁹Leonardo da Vinci, *Corpus of the Anatomical Studies in the Collection of Her Majesty the Queen at Windsor Castle*, by Kenneth D. Keele and Carlo Pedretti, London and New York, 1979 e 1980, 3 v., vol. 1, p. 362.

²⁰Cfr. Windsor, RL 19070 r: "scrivi la lingua del picchio". Vedi anche Windsor, RL 19113 r: "fu il moto della lingua del picchio".

²¹Cfr. Guglielmo Bilancioni, "Leonardo da Vinci e la lingua del picchio", in *Rivista di storia delle scienze mediche e naturali*, XVII, 1926, p. 1-18.

²²Roberto Marcolongo, *Leonardo artista-scienziato*, Milano, 1939, p. 127 e 194.

edizione (1940) di quegli studi¹¹. Delle diciotto tavole presenti nel "De motu animalium", la maggior parte mostra immagini con affinità stilistiche o tematiche con quelle di Leonardo. E quest'affinità non è riscontrabile solo nei disegni: ugualmente corrispondono diverse lettere di rimando. Ad esempio, le lettere H, C e A usate da Borelli nella figura 2 della tavola III coincidono con quelle del Codice Vaticano Urbinate di Leonardo, f. 120 v. È interessante notare che Borelli sembra seguire lo stesso ordine delle figure del codice di Madrid MS I: infatti il suo primo disegno ha elementi in comune con quelli presenti nell'ultima pagina precedente la prima sezione mancante nel Madrid I. Nello stesso Madrid I, f. 36 v troviamo il disegno di alcune pulegge, il cui numero è uguale al numero delle fibre muscolari nella prima illustrazione (figura 1) della tavola I di Borelli. Sempre alla tavola I, alla figura 3, è rappresentato un muscolo in cui il numero delle fibre corrisponde al numero dei giri di cavo del Madrid MS I, f. 36 v.

Da quanto osservato risulta evidente che lo studio comparativo dell'opera di Borelli e di Leonardo può agevolare la comprensione degli studi di biomeccanica di quest'ultimo; in particolare, sulla base delle molte somiglianze nel tema e nell'organizzazione del materiale, Borelli può essere usato come chiave di interpretazione di alcuni disegni di Leonardo, quali quelli del Codice Atlantico, f. 966 r [349 r-b], che rappresentano schematicamente il corpo umano e che ricordano i disegni della tavola V, figura 1 di Borelli. Il disegno del Madrid MS I f. 30 v presenta una somiglianza notevole con quello della tavola V, figura 6 di Borelli, nel quale viene illustrata la capacità di sollevamento delle gambe in rotazione. Infine, anche alla tavola XII, figura 4 di Borelli è possibile notare una certa analogia grafica con alcuni disegni del MS I f. 28 v e del CA f. 444 r [164 r-a] in cui è rappresentato l'asse attraverso gli arti di un corpo umano. Questi studi conducono direttamente all'applicazione pratica di Leonardo, il famoso cavaliere meccanico del 1493 circa. È in verità la figura 7 della tavola V di Borelli che potrebbe benissimo rappresentare un'esemplificazione delle intenzioni di Leonardo per la gamba del cavaliere meccanico.

1.4. *Copia scientifica dei disegni di Leonardo*

L'ultimo tassello di questo puzzle proviene da una porzione di una prima copia di disegni tecnologici di Leonardo, Offizi GDS n. 43 r [408] A r], un foglio di grandi dimensioni nel quale erano presenti disegni tecnologici a carattere meccanico e militare¹². I disegni in alto e in basso mostrano una forte

¹¹ Leonardo da Vinci, *I libri di meccanica*, nella ricostruzione ordinata da Arturo Uccelli, Milano, 1948.

¹² Riprodotto in facsimile ne *I disegni di Leonardo da Vinci e della sua architetture nel Galileo Disegni e Stampe della Galleria degli Uffizi a Firenze*, ordinati e presentati da Carlo Pedretti, catalogo di Gigetta Dalli Regoli, Firenze, 1973, p. 20-21, n. 43 [408] A]. Vedi anche Mark E. Rosheim, "Leonardo's Robot", op. cit. (nota 7), p. 109, fig. 32.

analogia con il disegno del C.A.L. 812 r [196 v-4], una vista dall'alto di un meccanismo dotato di due grandi ingranaggi con molle a balestra. Sebbene la forma sia differente — un bilanciere che agisce su due ingranaggi indipendenti a fermare uno scappamento —, il concetto di base resta lo stesso. Si tratta in definitiva di un bilanciere, mantenuto in tensione tramite cavi collegati alle molle a balestra, il quale crea uno scappamento che regola la velocità degli ingranaggi, oscillanti avanti e indietro a $m\dot{o}$ di altalena. Le due ruote, presenti sul fondo della macchina, sono forse da considerarsi finalizzate alla locomozione, per quanto la loro interpretazione risulti difficile allo stato attuale.

Proprio questo elemento, lo scappamento che agisce sui tamburi, ha costituito la conferma di quanto già avevo sospettato, cioè che le molle a balestra che si innestano nelle ruote dentate costituiscono un meccanismo di scappamento. Alla luce di quest'ultima intuizione, sono stato in grado di iniziare la ricostruzione del disegno.

RICOSTRUZIONE E FUNZIONAMENTO

II.1. Ricostruzione

Fu nel 1929 che Guido Semenza, per primo, interpretò la macchina rappresentata al CA f. 811 r [296 v-a] come veicolo semovente; da allora tutti gli studiosi di Leonardo che hanno dato un'interpretazione di questo disegno lo hanno fatto partendo dal presupposto che le molle a balestra in esso raffigurate fossero la fonte della forza motrice³⁷. Questa lettura delle notazioni grafiche di Leonardo ha comportato, ovviamente, modifiche e alterazioni arbitrarie al disegno originale, principalmente l'aggiunta di cavi che trasmettessero la potenza dalle molle a balestra ai tamburi. Diversi studiosi, tra i quali Giovanni Canestrini, Arturo Uccelli e Jotti da Badia Polesine, discussero, anche animatamente, su questioni irrilevanti relative ai particolari del disegno, tutti però concordi nel riconoscere l'ingegnosità di Leonardo come inventore di quello che essi ritenevano rappresentare il primo esempio di ingranaggio differenziale³⁸. Non

24

³⁷ Cfr. Carlo Pedretti, *The Codex Atlanticus of Leonardo da Vinci. A catalogue of its Nearly Extent Sheets*, New York, 1968-1979, vol. II, p. 125-126, terzo numero di foglio 811 r. La bibliografia su questo argomento include, in ordine cronologico: Guido Semenza, "L'automobile di Leonardo", in *Archiv*, IX, n. 1, 1908, p. 98-104; Arturo Uccelli, "L'automobile a molle e Leonardo da Vinci", in *La Lettura*, n. 3, marzo 1916, p. 7-8; dello stesso autore, "Leonardo e l'automobile", in *Raccolta Vinciana*, XV-XVI, 1915-1916, p. 191-199; Giovanni Canestrini, *Leonardo costruttore di macchine e di veicoli*, Roma, 1929, in particolare le p. 67-129 (edizione ristampata dal volume dello stesso autore *L'automobile. Il contributo italiano all'avvento dell'automobile*, Roma, 1934). Vedi anche l'interpretazione di un altro ingegnere, Enrico Gigli, pubblicata in seguito in Mariolina Angiolillo, *Leonardo. Feste e testi*, presentazione di Carlo Pedretti, Napoli, 1979, tav. 6 con testo esplicativo.

Gli studi più recenti sull'argomento sono i seguenti: Mario Loria, "Bacca macchina e ruota motrice. L'automobile di Leonardo", in *Leonardo nelle scienze e nelle tecniche. Atti del Simposio Internazionale di Storia della Scienza, Firenze-Vinci, 21-26 giugno 1976*, Firenze, 1979, p. 101-103; Augusto Martinoni, *Leonardo da Vinci. L'automobile e la biologia*, Milano, 1981, n. dello stesso autore, "Leonardo's Impossible Machines", in *Leonardo da Vinci Engineer and Architect*, Montreal, 1985, p. 111-120, ed in particolare p. 124-125. Vedi infine Mark B. Rothstein "Leonardo's Lost Robot", *op. cit.* (nota 7), in particolare l'appendice alla p. 109-110; "Leonardo's 'Automobile' and Hans Burgkmair's Gale Carriage".

³⁸ L'interpretazione dei disegni di Leonardo come illustrazione di un ingranaggio differenziale

superiore. Le tre figure sul fondo potrebbero illustrare un ulteriore meccanismo di comando del carrello. Al centro del disegno, immediatamente al di sopra della veduta dall'alto principale, si scorge un meccanismo a pignone e cremagliera, con l'assale del pignone che termina con una manovella. Credo che si tratti dello stesso pignone montato sulla molla di richiamo destra illustrata nell'angolo sinistro inferiore del foglio. Sopra se ne vede una versione alternativa, con cavo e bobina, più semplice ed economica. In questo caso sarebbe la bobina, e non la ruota dentata, a innestarsi nel rullo di punteria. In base alla figura in basso a sinistra, questo sottogruppo risulta montato sulla molla di richiamo superiore sinistra. Si tratta di una collocazione della cremagliera opposta a quella della veduta dall'alto, in cui si trova presso la molla di richiamo destra. Questo tipo di meccanismo consente lo svolgimento di due funzioni: in primo luogo, è possibile conseguire il rallentamento del carrello grazie alla resistenza fornita dalla camma dedicata; in secondo luogo, il rallentamento del meccanismo a pignone e cremagliera potrebbe consentire un qualche "effetto speciale", ad esempio l'apertura di uno sportello.

Poiché il carrello rappresentato è a trazione anteriore, le due ruote dentate risultano motrici; questa mia interpretazione prende le mosse dall'effetto di deviazione delle molle a balestra di scappamento sulle ruote dentate angolari prodotto dai mozz, i quali vanno a costituire un treno d'ingranaggi unidirezionale che funziona da dente di arresto. L'intuizione di Carlo Pedretti, secondo cui le molle a balestra non potevano produrre un numero di giri al minuto sufficiente a consentire lo spostamento del carrello per distanze utili, unita all'analisi del portatore di tè giapponese, mi ha consentito di giungere alla conclusione che, come a ragione ipotizzato dallo stesso Pedretti, sotto i grandi ingranaggi debbano esserci delle grandi molle a spirale²⁷. La mia ipotesi è che l'insieme di archi illustrati alla figura in basso al centro del CA f. 378 r [340 r-a] possa corrispondere proprio a una di queste molle. L'avvolgimento delle molle stesse del carrello potrebbe essere stato eseguito tramite una delle ruote dentate angolari, sfruttando la riduzione degli ingranaggi. La forza generata da queste molle sarebbe non indifferente, forse nell'ordine dei sottomultipli di un cavallo vapore. Altri fogli mostrano rappresentazioni alternative probabilmente anteriori.

Un secondo sistema di ingranaggi del tamburino mobile è illustrato in

²⁷ Per una discussione di questa ipotesi, vedi anche Mark E. Roseheim, "Leonardo's Lost Robot", op. cit. (nota 7), p. 129, nota 7. Carlo Pedretti ha dimostrato come una molla a spirale con applicazioni simili a questa si trovi nel disegno del cosiddetto "elicottero", Paris MS. B. f. 83 v., risalente al 1487-90 circa. A questo proposito, vedi Carlo Pedretti, *Stati Visibili. Documenti, analisi e ipotesi inventuali*, Genève, 1917, p. 124-129 e *Leonardo. The machines*, op. cit. (nota 11), p. 8-10 e 29. Vedi anche Giovanni P. Goldi, "Leonardo's Helicopter and Archimedes' Screw. The principle of Action and Reaction", in *Ateneum Leonardo*, IV, 1991, p. 193-199.

come mostrato al CA f. 812 r [296 v-a]. I telai contengono due sottosistemi interdipendenti atti alla propulsione ed alla guida. Facendo riferimento alla figura che presenta la vista dall'alto, credo che il lato destro debba essere interpretato come quello dedicato allo sterzo; ciò è evidenziato dal gruppo di destra, dotato di diverse camme sull'ingranaggio a tamburo. Il gruppo di sinistra è quello usato per la propulsione, vista la presenza di una molla di richiamo per il rullo di punteria con vite e dado, come evidente dal disegno al CA f. 878 v [320 v-a]. Il controllo della tensione dei rulli di punteria significa quindi controllarne la velocità.

Questa interpretazione del disegno è avvalorata dalla scelta, da parte di Leonardo, del lato sinistro del carrello per lo schizzo in prospettiva illustrato al CA f. 812 r [296 v-a], nel quale ha voluto dare un'idea generale della propulsione della macchina. Qui ogni balestra a scappamento consiste di due molle, che si uniscono e si innestano nella ruota dentata d'angolo. I due ingranaggi a tamburo dei sottosistemi di propulsione e di sterzo sono accoppiati, in modo tale che questi stessi sottosistemi risultino in fase. L'interazione dei due sottosistemi fa sì che si venga a creare uno scappamento completo, il quale consente di regolare la velocità delle grandi molle e quindi dei grandi ingranaggi. Il rapporto di trasmissione dalle molle alle ruote motrici dentate aumenta i giri al minuto delle molle stesse, rendendo massima la capacità di spostamento del carrello programmabile per automi.

Le camme a forma di petalo che si trovano sulla sommità degli ingranaggi conducono i due rulli di punteria a forbice, i quali vengono mantenuti a contatto con le camme dalle molle di richiamo dello scappamento a balestra. Queste molle sono state erroneamente interpretate in passato come fonte di propulsione della macchina, ma si tratta in realtà di molle di richiamo per i rulli di punteria, probabilmente in legno ricurvo, il materiale più indicato, dal momento che non è necessaria una grande forza per mantenere i rulli di punteria a contatto con le camme. Nella porzione a sinistra della vista d'insieme i bracci dei rulli di punteria a forma di forbice sono mostrati in prospettiva mentre si innestano nei lobi delle camme, a sinistra per la propulsione e a destra per lo sterzo. Il disegno di dimensioni inferiori che si trova al di sopra di questa prospettiva mostra forse una vista parziale dall'alto delle forbici o uno studio geometrico delle stesse.

Lo schema in prospettiva rappresenta solo uno stadio preliminare del progetto; e Leonardo sembra aver esplorato due diverse possibilità per lo sterzo: la prima prevede una specie di volante di sterzo collegato da un lato alla ruota e comandato dall'altro da una tiranteria; la seconda sembra invece rappresentare una ruota montata direttamente al di sotto del carrello, con l'albero della forcina collegato al braccio del rullo di punteria

superiore. Le tre figure sul fondo potrebbero illustrare un ulteriore meccanismo di comando del carrello. Al centro del disegno, immediatamente al di sopra della veduta dall'alto principale, si scorge un meccanismo a pignone e cremagliera, con l'assale del pignone che termina con una manovella. Credo che si tratti dello stesso pignone montato sulla molla di richiamo destra illustrata nell'angolo sinistro inferiore del foglio. Sopra se ne vede una versione alternativa, con cavo e bobina, più semplice ed economica. In questo caso sarebbe la bobina, e non la ruota dentata, a innestarsi nel rotolo di punteria. In base alla figura in basso a sinistra, questo sottogruppo risulta montato sulla molla di richiamo superiore sinistra. Si tratta di una collocazione della cremagliera opposta a quella della veduta dall'alto, in cui si trova presso la molla di richiamo destra. Questo tipo di meccanismo consente lo svolgimento di due funzioni: in primo luogo, è possibile conseguire il rallentamento del carrello grazie alla resistenza fornita dalla camera dedicata; in secondo luogo, il rallentamento del meccanismo a pignone e cremagliera potrebbe consentire un qualche "effetto speciale", ad esempio l'apertura di uno sportello.

Poiché il carrello rappresentato è a trazione anteriore, le due ruote dentate risultano motrici; questa mia interpretazione prende le mosse dall'effetto di deviazione delle molle a balestra di scappamento sulle ruote dentate angolari prodotta dai mozzi, i quali vanno a costituire un treno d'ingranaggi unidirezionale che funziona da dente di arresto. L'intuizione di Carlo Pedretti, secondo cui le molle a balestra non potevano produrre un numero di giri al minuto sufficiente a consentire lo spostamento del carrello per distanze utili, unita all'analisi del portatore di sé giapponese, mi ha consentito di giungere alla conclusione che, come a ragione ipotizzavo dallo stesso Pedretti, sotto i grandi ingranaggi debbano esserci delle grandi molle a spirale¹⁷. La mia ipotesi è che l'insieme di archi illustrati alla figura in basso al centro del CA f. 878 r [320 r-a] possa corrispondere proprio a una di queste molle. L'avvolgimento delle molle stesse del carrello potrebbe essere stato eseguito tramite una delle ruote dentate angolari, sfruttando la riduzione degli ingranaggi. La forza generata da queste molle sarebbe non indifferente, forse nell'ordine dei sottomultipli di un cavallo vapore. Altri fogli mostrano rappresentazioni alternative probabilmente anteriori.

Un secondo sistema di ingranaggi del tamburino mobile è illustrato in

¹⁷ Per una discussione di questa ipotesi, vedi anche Mark E. Rosehm, "Leonardo's Lost Robot", op. cit. (nota 7), p. 109, nota 7. Carlo Pedretti ha dimostrato come una molla a spirale con applicazione simile a questa si trovi nel disegno del cosiddetto "elicottero", Paris MS. B. f. 83 v., risalente al 1487-90 circa. A questo proposito, vedi Carlo Pedretti, *Studi Vinciani. Documenti, analisi e modelli ricostruiti*, Genova, 1977, p. 117-122 e *Leonardo. The machine*, op. cit. (nota 11), p. 8-10 e 29. Vedi anche Giovanni F. Galdi, "Leonardo's Helicopter and Archimedes' Screw. The principle of Action and Reaction", in *Ateneum* Leonardo, IV, 1991, p. 191-199.

basso a destra del CA f. 878 v [320 v-a], mentre al centro dello stesso foglio, sulla sinistra, si trovano alcuni disegni preliminari di una cintreria a parallelogramma. Sempre in questo foglio si fornisce anche un dettaglio importante per la ricostruzione del carrello, cioè la ruota dentata angolare destra, con il suo ingranaggio più piccolo innestato nell'ingranaggio a tamburo.

Un ulteriore sistema di ingranaggi per il tamburino mobile, simile a quello a cui abbiamo accennato sopra, è rappresentato nell'angolo in basso a destra del CA f. 878 r [320 r-a], insieme ad una cintreria a parallelogramma, al centro del foglio. Un altro meccanismo a parallelogramma, simile a quelli sopra citati, è visibile nel disegno degli Uffici GDS n. 7 r [446 E-r], in prossimità del bordo dove il disegno è stato tagliato. Si potrebbe trattare di abbozzi di un meccanismo divisore. Infine, un secondo sistema di ingranaggi è anche illustrato al CA f. 926 r [339 r-a] e f. 956 r [347 r-b].

I disegni al CA f. 956 v [347 v-b] presentano un particolare motivo di interesse, in quanto mostrano elementi già noti da altri disegni, ad esempio la camma sinusoidale a scambiatore multiple illustrata nel disegno degli Uffici GDS n. 9 r [447 E r] "Studi di figure, appunti, congegni meccanici". A questo proposito è interessante confrontare anche il disegno presente sul verso dello stesso foglio, nel quale sono presenti studi decisamente iniziali del carrello programmabile. Al foglio 18 (VII) dell'Ashmolean Museum in alto al centro si trova il disegno di un piccolo riquadro, che potrebbe essere messo in relazione con il meccanismo di comando illustrato in basso al CA f. 812 r [296 v-a]¹².

Sebbene i disegni di cui abbiamo discusso possano aver rappresentato semplicemente prime variazioni dello stesso soggetto, non è da escludere che rappresentino meccanismi propulsori aggiuntivi o alternativi. È possibile che il carrello fosse dotato di alberi verticali rotanti, usati per azionare sportelli o altri meccanismi utilizzati per artifici teatrali, quali il sollevamento di un leone meccanico sulle zampe posteriori e l'apertura delle zampe anteriori, a rivelare così un torace ricolmo di gigli di Francia.

II.1. Funzionamento: propulsione e comando

Le molle a spirale montate all'interno degli ingranaggi a tamburo sono regolate da un meccanismo con bilanciere e scappamento a Foliot simile a quello usato negli orologi. Il suo funzionamento è assicurato dall'interazione delle ruote dentate angolari e dalle molle a balestra di scappamento, le quali svolgono la stessa funzione delle estremità della verga in

¹² I disegni degli Uffici e di Oxford costituiscono studi per un'adattamento dei pezzi sulla quale Leonardo lavorava nel 1478, a conferma, dunque, della data di produzione del carrello. Cfr. A.E. Popham, *The Drawing of Leonardo da Vinci*, London, 1945, tav. 10-11.

un orologio, con le punte delle molle a balestra che vanno a corrispondere alle palette della verga. Entrambe le ruote dentate angolari svolgono insieme la funzione di una singola ruota dentata in un orologio. Le ruote motrici con i loro rispettivi treni di ingranaggi sono invece equivalenti allo scappamento a Foliot o massa del sistema. Lo smorzamento del sistema è agevolato dall'elasticità delle molle di scappamento a balestra.

35 Durante il funzionamento, le ruote dentate angolari girano in direzione delle proprie molle a balestra, con uno sfasamento di mezzo passo l'una rispetto all'altra; in tal modo, l'oscillazione del sistema provoca una sorta di "click-click" prodotto dal rilascio graduale delle molle a balestra da parte delle ruote dentate. Il carrello programmabile viene quindi caricato girando le ruote dentate in senso orario, superando la resistenza offerta dalle molle a balestra; l'avvolgimento avrebbe potuto generare un suono "clack-clack".

36 La propulsione del sistema è generata dalle due molle alloggiare nei tamburi e collegate direttamente alle due ruote più grandi che comandano le ruote più piccole, a loro volta collegate agli alberi delle ruote dentate angolari. Sono quest'ultimi a comandare le ruote cilindriche a perni e quindi le ruote a raggi, consentendo lo spostamento in avanti del carrello.

37 La direzione e la velocità del carrello per autonomi sono regolate dalla serie di camme che si trovano sulla sommità degli ingranaggi a tamburo; la loro rotazione provoca infatti la rotazione dei rulli di punteria a forbice. Questi rulli di punteria vengono mantenuti a contatto con le camme dalle molle di richiamo per mezzo di cavi incrociati. Il rullo di punteria della camma di sterzo è collegato al maniglione ed alla sua ruota di sterzo sotto il perno.

Le camme di propulsione sull'ingranaggio grande di sinistra regolano la velocità del carrello, e sono forse in grado anche di frenarlo momentaneamente. Il funzionamento ricalca quello degli "stackfreed" usati nei primi orologi a molla. Lo "stackfreed" è infatti realizzato con una camma collocata sulla sommità di un barileto e dotata di un braccio caricato a molla che fa pressione su di esso, con una resistenza pari alla coppia creata dallo avvolgimento della molla. È possibile che il carrello potesse essere rallentato o momentaneamente fermato da alcune camme a forma di petalo. Il rullo di punteria avrebbe forse potuto anche comandare un sottogruppo a pignone e cremagliera. La rotazione della molla di richiamo avrebbe quindi provocato il movimento verticale del pignone sulla cremagliera, probabilmente azionando un meccanismo per un dispositivo ausiliario, quale ad esempio uno sportello.

Partendo da un punto iniziale, il carrello programmabile era quindi in grado di spostarsi in avanti, seguire un percorso programmato, fermandosi e ripartendo, girando a destra e a sinistra; percorso che poteva prevedere

anche l'introduzione, in qualche punto, di una serie di "effetti speciali". Il suo programma era determinato dal numero, dalla forma e dalla collocazione delle camme sulla sommità dei due ingranaggi di maggiori dimensioni. Ciascuna camma rappresentava infatti un singolo messaggio di istruzione, o "riga di codice". Il "programma" è latente nelle camme e viene predeterminato dal programmatore, che può eseguirne il "debug" o modificarlo.

II.3. Conclusioni

Il carrello programmabile per automi di Leonardo è, nella storia della civiltà, il primo esempio conosciuto di computer analogico programmabile. In esso possiamo riconoscere il primo tentativo di Leonardo di disegnare automi; tentativo culminato nel sofisticatissimo cavaliere meccanico del 1495¹²; applicazione pratica basata sui suoi studi pionieristici di biomeccanica. È l'uso che Leonardo fa di tali meccanismi ad un'età così giovane ne mette ancora più in evidenza il talento. La sua abilità nell'eseguire un progetto che contemporaneamente abbini all'estrema compattezza la complessità di funzionamento e di controllo, riporta in mente le sue stesse parole:

34-38

Quando voi fare uno effetto per istrumento, non ti allungare in confusione di molti membri, ma cerca il più breve modo; e non fare come quelli che non sapendo dire una cosa per lo suo proprio vocabolo, vanno per via di circunione e per molte lunghezze confine¹³.

Le perdite gravissime sofferte dall'insieme delle opere di Leonardo, delle quali quelle del codice di Madrid MS I non sono che un esempio, hanno contribuito ad attribuire al Vinci la fama, immeritata, di compilatore poco organizzato, seppur di talento. Una ricostruzione corretta della sua opera continuerà a richiedere una conoscenza specialistica in vari e differenti campi.

¹² Vorrei qui correggere la mia interpretazione del CA f. 379 r (116 v-4), presentata in "Leonardo's Last Robot", op. cit. (nota 7), p. 121-123 e fig. 9, proponendo l'immagine centrale non come un meccanismo per altre figure, ma come una combinazione di ruote motrici e ruote folli. Le ruote folli sarebbero quelle in alto a sinistra, mentre al centro in basso sarebbe illustrata la ruota motrice in prospettiva. Vedi in proposito la mia ricostruzione del cavaliere meccanico di Leonardo nel CD-ROM *Mechanical Marvels. Invention in the Age of Leonardo*, Firenze, 1997. In queste mie pubblicazioni ho cercato di riprodurre tutto quello che nei manoscritti di Leonardo può essere riferito al progetto del robot. Ma per completezza ti propono ora aggiungere altri accenni in incisioni o fogli dello stesso periodo, c. 1497-1498: Codice Forster II/5, f. 61 r-v; Codice Arundel, f. 41 r; CA, ff. 320 v r (120 r-4), 330 b r (120 r-2) e 369 r (134 r-4).

39-44

¹³ CA f. 149 v (104 v-3), 1497 circa.

Le intuizioni di Leonardo nel campo della biomeccanica non troveranno piena applicazione che due secoli dopo, con il *De motu animalium* di Giovanni Alfonso Borelli. Zubov, in modo appropriato, definisce Leonardo il "padre spirituale" di Borelli¹⁵. È invece singolare che Pierre Duhem, fervente sostenitore della teoria secondo cui molte delle idee del Vinci sarebbero state riprese e copiate da suoi successori, non nomini mai Borelli¹⁶. Forse non sarà mai possibile provare che quest'ultimo, appunto, abbia mutuato idee da Leonardo. Certamente però sembra più che una coincidenza il fatto che il suo approccio alle teorie di biomeccanica ricalchi così fedelmente quello leonardiano. Ancora una volta, ci si trova a considerare le parole di Giovan Paolo Lomazzo, il quale, alla fine del sedicesimo secolo, riporta come Leonardo avesse trovato il modo di "andar i leoni per forza di ruote", cioè a riprova dell'impatto che le sue idee in campo tecnologico, grazie alla disseminazione dei suoi manoscritti in tutto il mondo, dovevano aver avuto sui suoi successori.

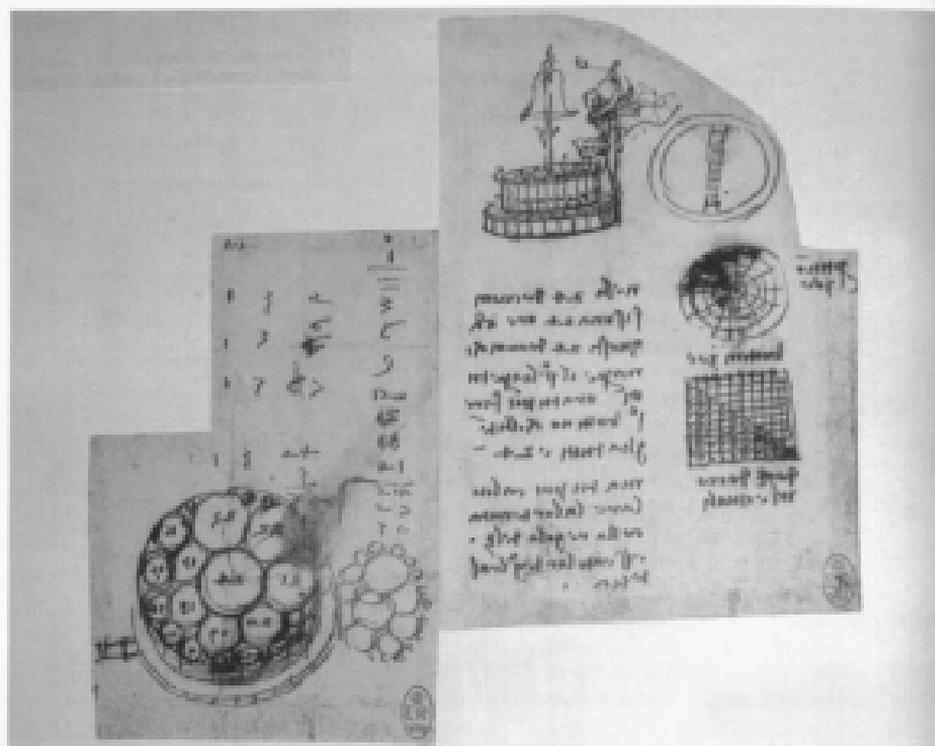
"Ma sopra a tutti questi scrittori — conclude il Lomazzo — è degno di memoria Leonardo Vinci, il qual insegnò l'anatomia de i corpi umani, e de i cavalli, ch'io ho veduto apresso a Francesco Melao, designata divinamente di sua mano. Dimostrò anco in figura tutte le proportioni de i membri del corpo umano; scrisse delle prospettive de i lumi, del modo di tirare le figure maggior del naturale, e molti altri libri, dove insegnò quanti moti et effetti si possano considerare nella Mathematica, e mostrò l'arte del tirare i pesi con facilità, de i quali tutta l'Europa è piena e sono tenuti in grandissima stima da gli intendenti, perché giudicano di non potersi far di più di quello che egli ha fatto"¹⁷.

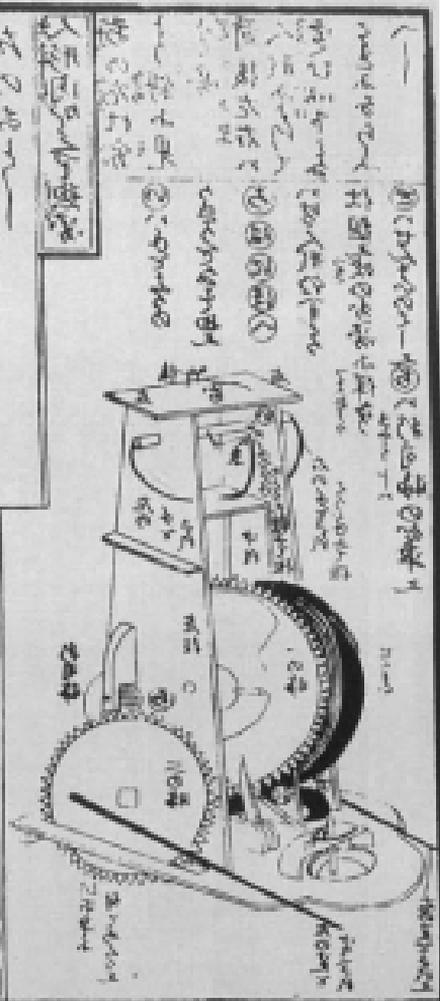
¹⁵ V.F. Zubov, *Leonardo da Vinci*, op. cit. (nota 13), p. 114.

¹⁶ Pierre Duhem, *Études sur Léonard de Vinci. Ceux qu'il a fait et ceux qui l'ont fait*, Paris, 1906, 1909 e 1913, 1°.

¹⁷ Giovan Paolo Lomazzo, *Arte del Tirope della Pittura di Gio. Paolo Lomazzo pittore Milano*, 1598, p. 17. Cfr. Luca Beltrami, *Documenti e memorie riguardanti la vita e le opere di Leonardo da Vinci in ordine cronologico*, Milano, 1919, p. 106.

ILLUSTRAZIONI



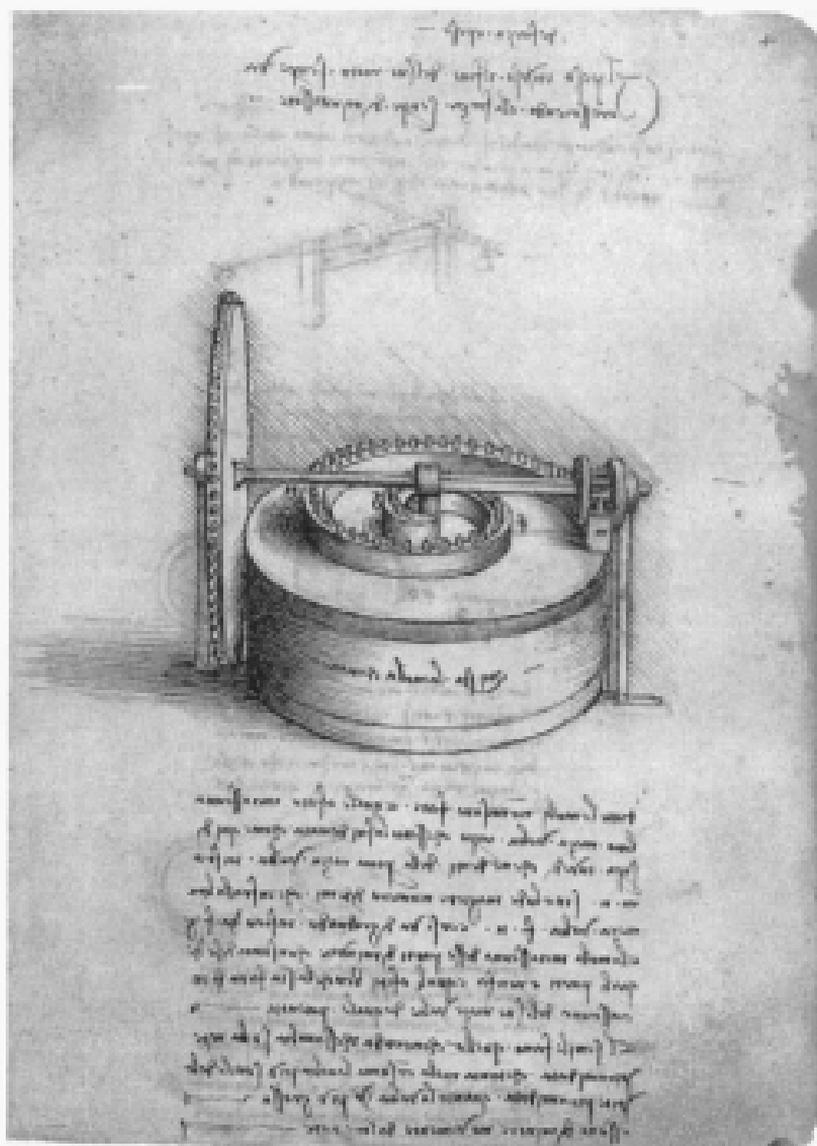


1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65
 66
 67
 68
 69
 70
 71
 72
 73
 74
 75
 76
 77
 78
 79
 80
 81
 82
 83
 84
 85
 86
 87
 88
 89
 90
 91
 92
 93
 94
 95
 96
 97
 98
 99
 100

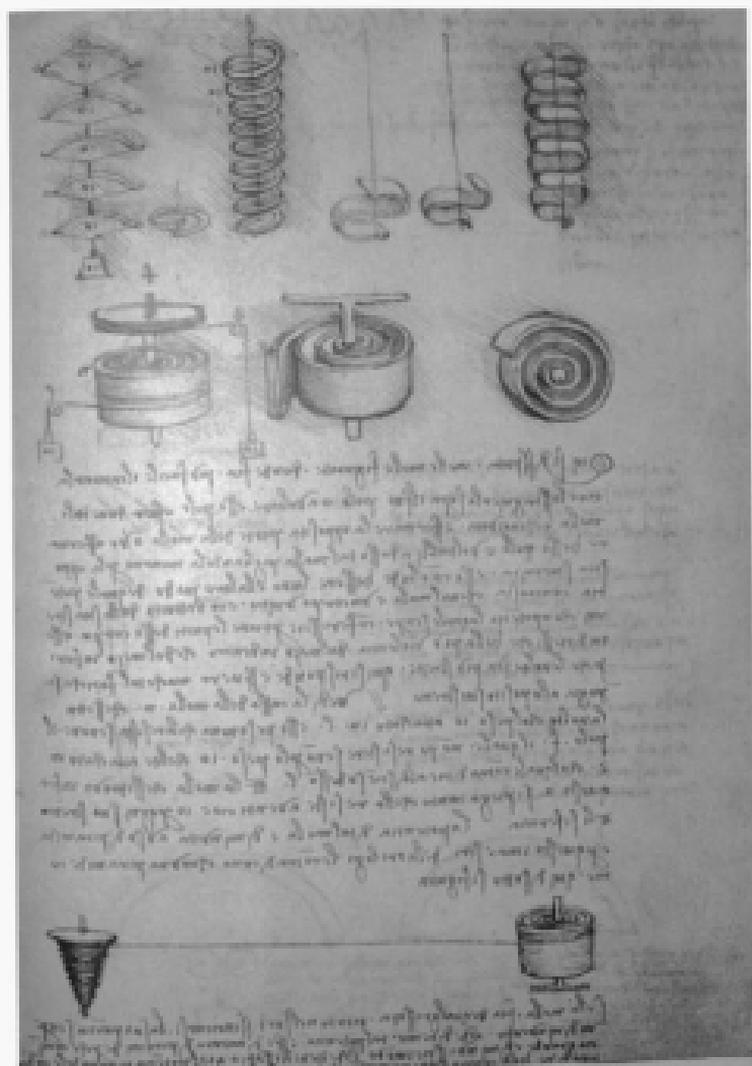
1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65
 66
 67
 68
 69
 70
 71
 72
 73
 74
 75
 76
 77
 78
 79
 80
 81
 82
 83
 84
 85
 86
 87
 88
 89
 90
 91
 92
 93
 94
 95
 96
 97
 98
 99
 100

箱全





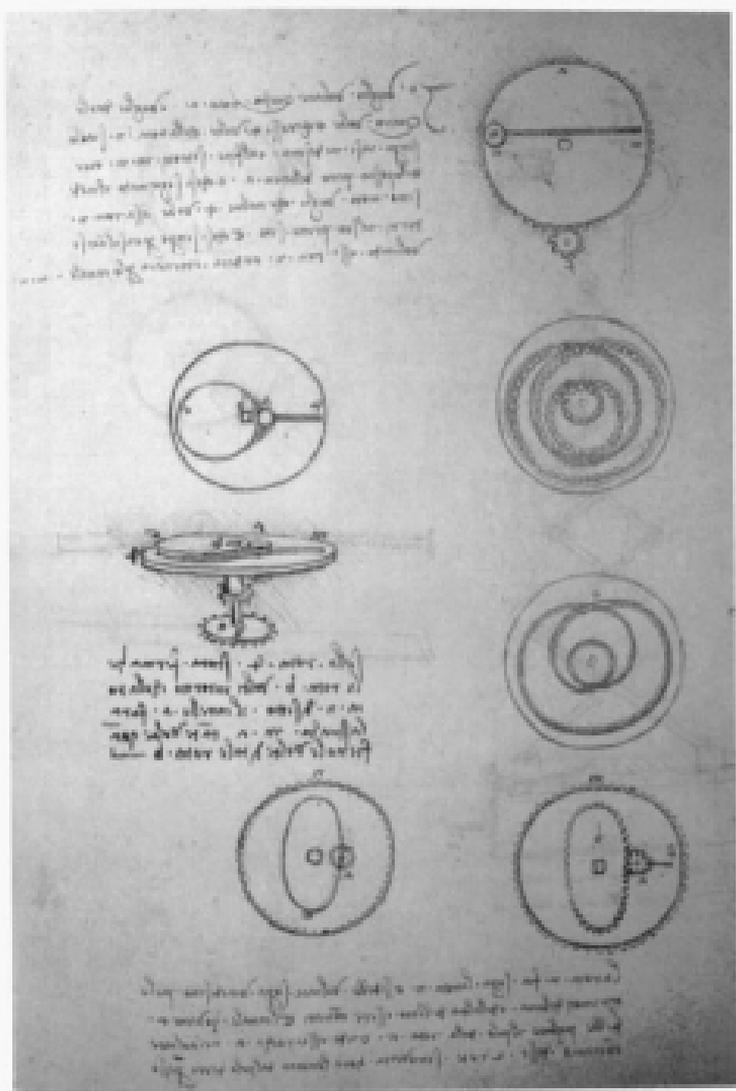
1. Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid* nella Biblioteca Nazionale di Madrid. Ms. I, l. 4 r
 ingranaggio motore a molla.



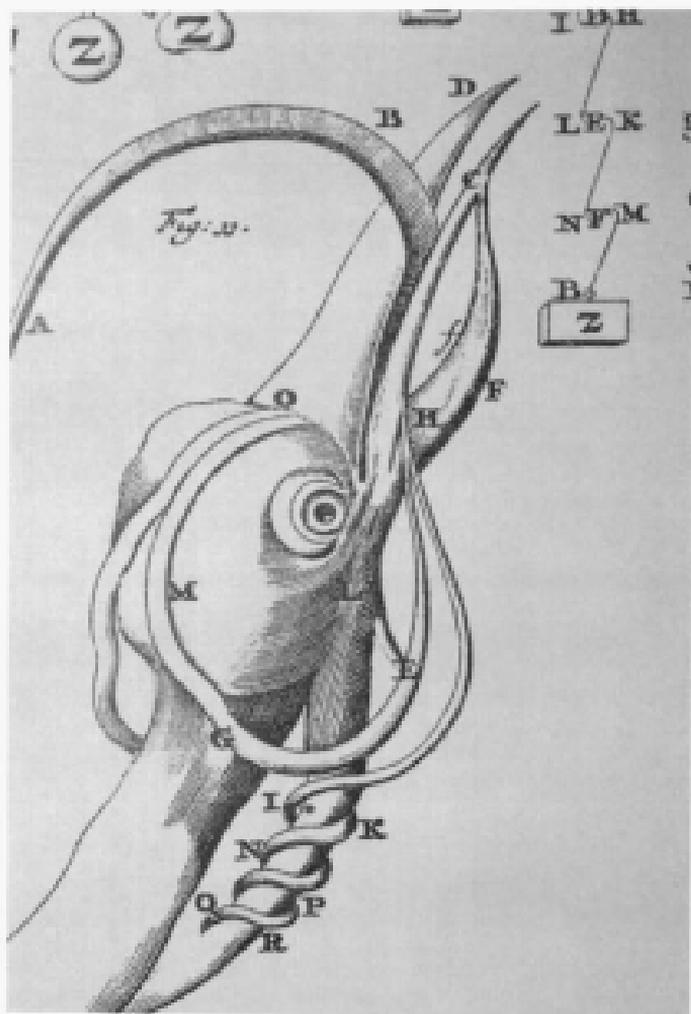
6. Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid* nella Biblioteca Nazionale di Madrid. No. 1, f. 15 r: tipologie di molle.

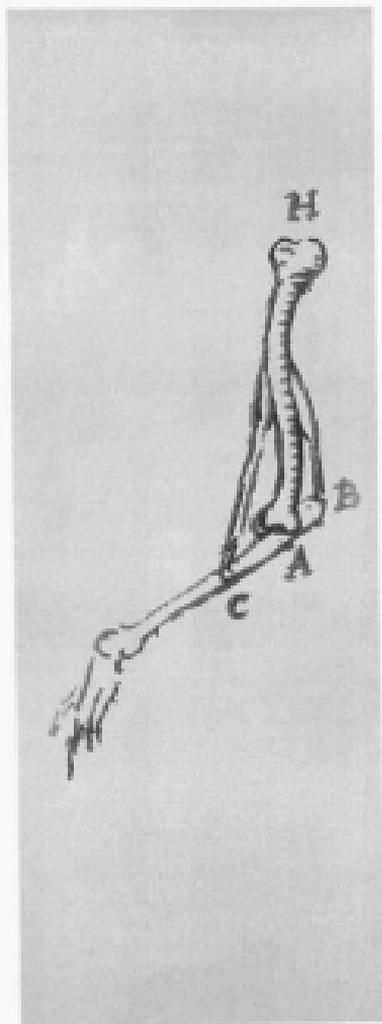
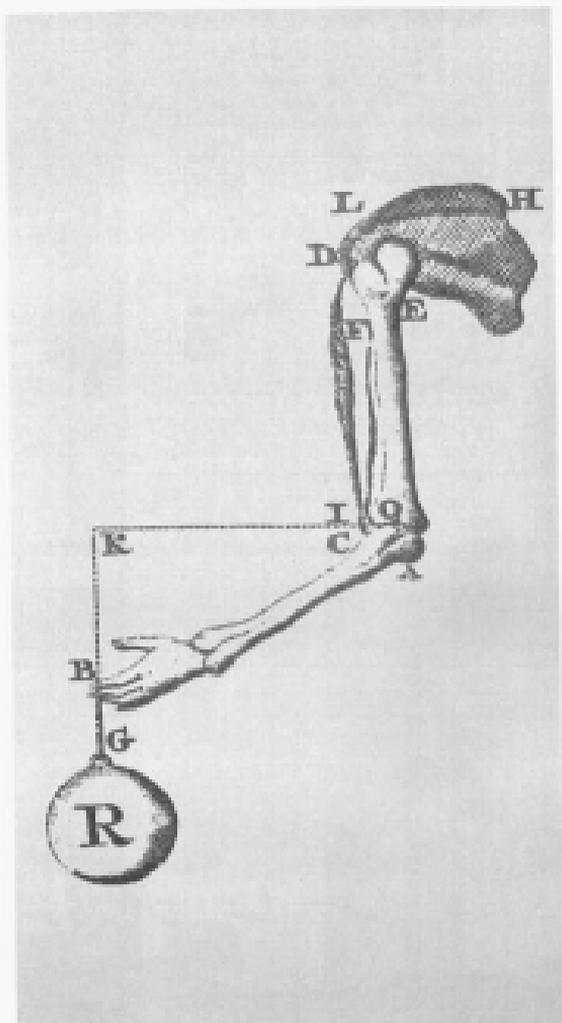


7- Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid nella Biblioteca Nazionale di Madrid. Ms. I, f. o v. carmine.*



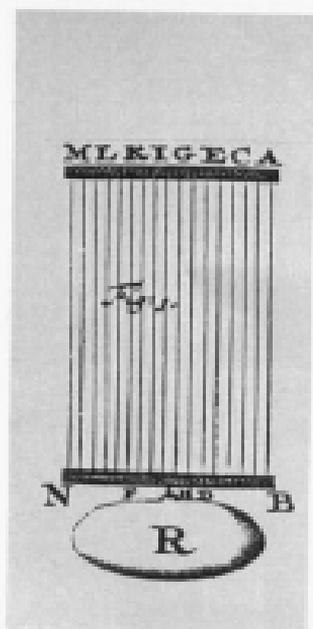
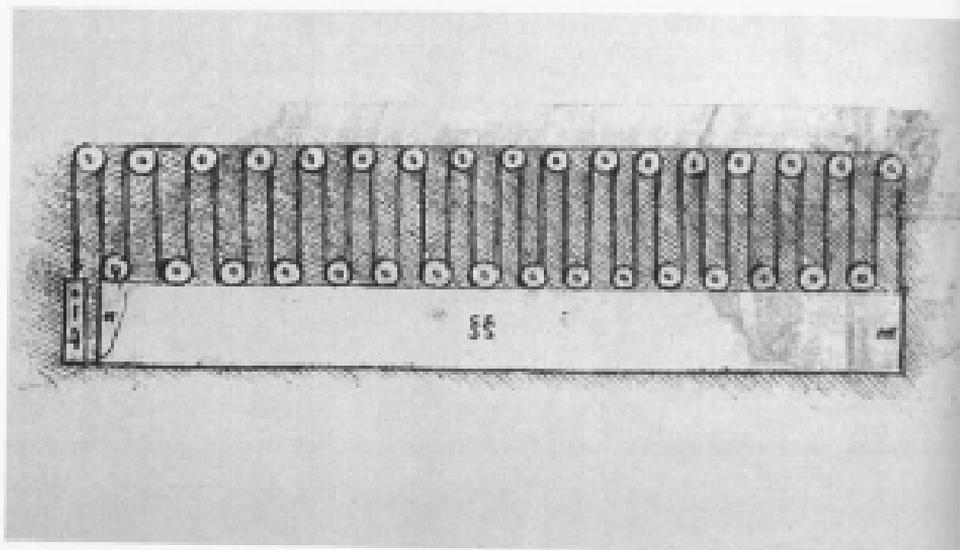
B. Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid nella Biblioteca Nazionale di Madrid*. Ms. I, f. 14 r. cuneo.





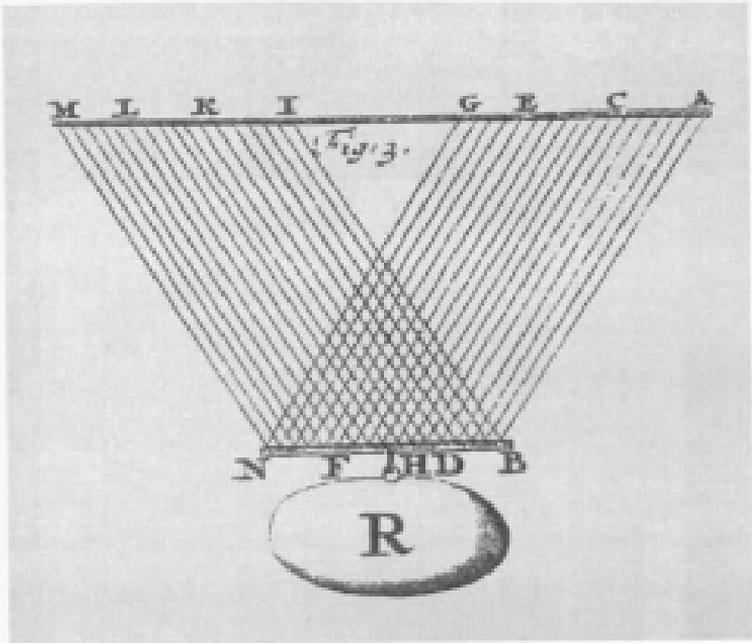
10. G. A. Bordi, *De ossa animalium*, tom. III, fig. 2.

11. Leonardo da Vinci, *Libro di pittura*. Codex Vaticanus Urbinate lat. 1479 nella Biblioteca Apostolica Vaticana, f. 120 v (particolare).



11. Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid* nella Biblioteca Nazionale di Madrid. No. 1, f. 96 v (particolare).

12. G. A. Borelli, *De motu animalium*, tom. 1, fig. 2.



117
... ..
... ..

... ..
... ..



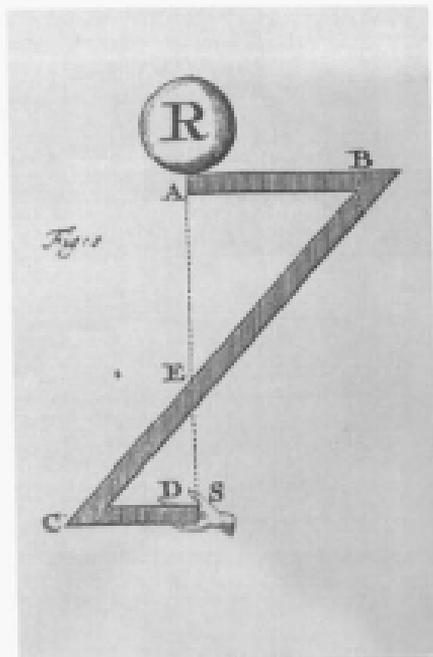
118
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..



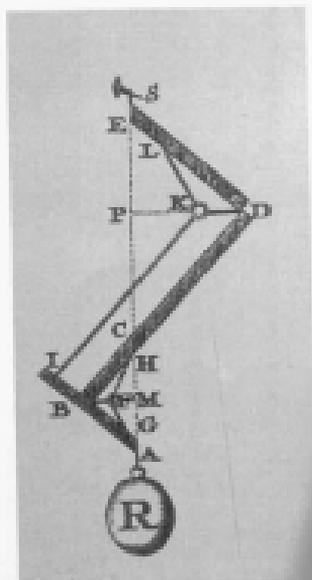
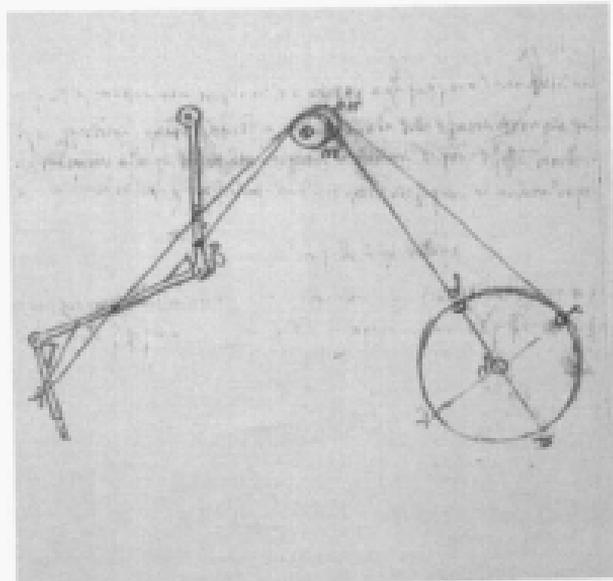
11. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico*
della Biblioteca Ambrosiana di Milano, f. 966
r (149 r-b) (particolari).

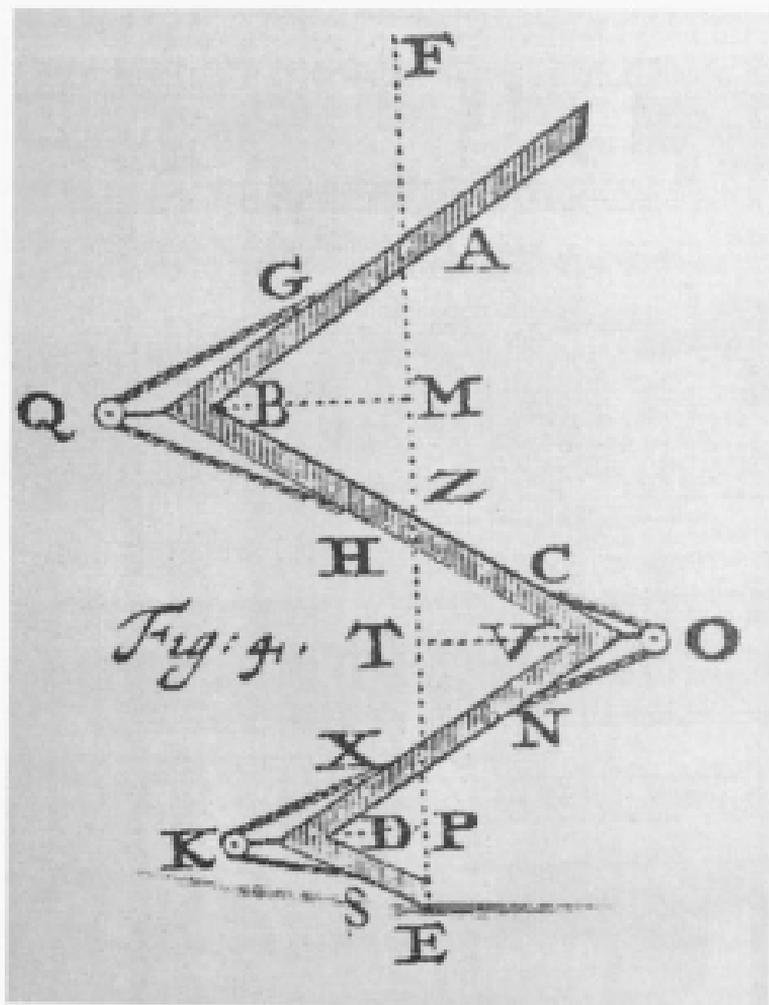


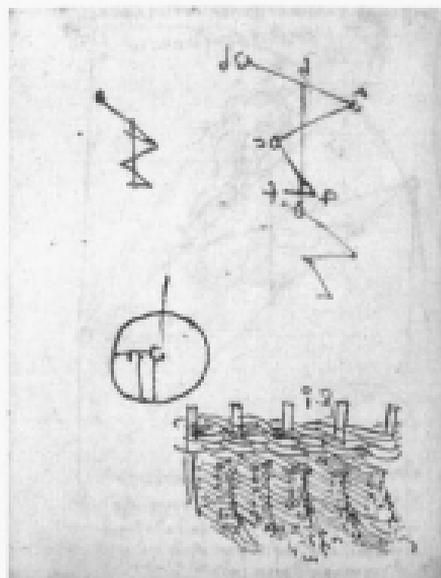
16. G. A. Borelli, *De motu animalium*,
t. V, fig. 2.

17. Leonardo da Vinci, *I Codici
di Madrid nella Biblioteca Nazionale
di Madrid. Ms. I, f. 90 v.*

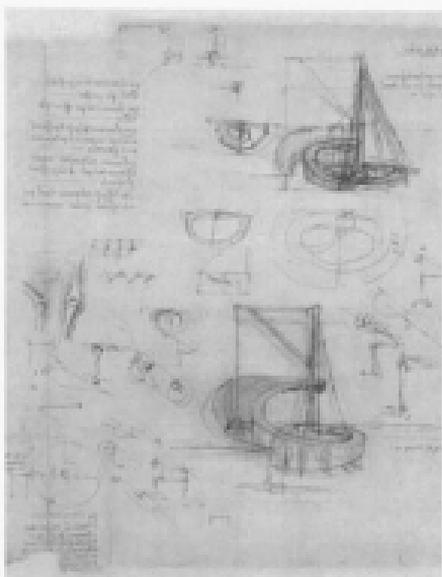
18. G. A. Borelli, *De motu animalium*,
t. V, fig. 6.







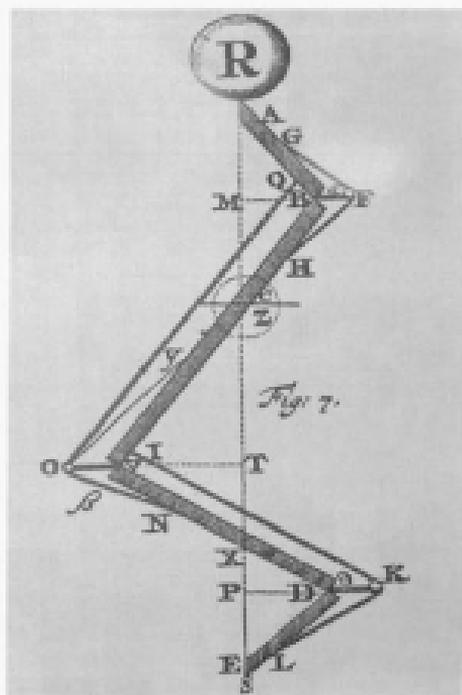
10



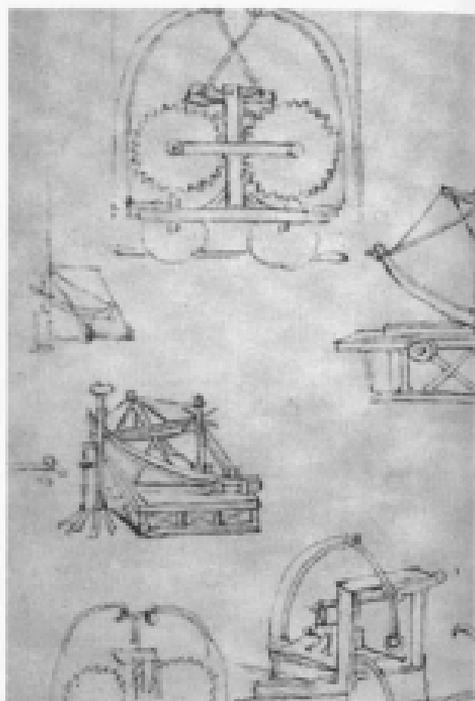
11

10. Leonardo da Vinci, *I manoscritti dell'Instituto di Francia. Il Manoscritto L, f. 18 v.*

11. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano, f. 404 r (164 r-v) (particolare).*



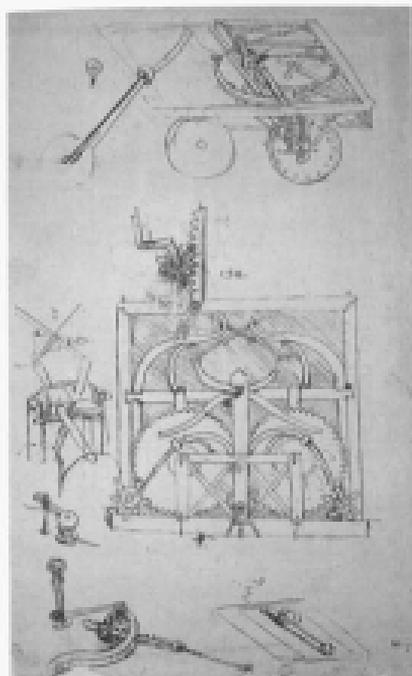
11



12

11. G. A. Borelli, *De motu animalium*, tom. V, fig. 7.

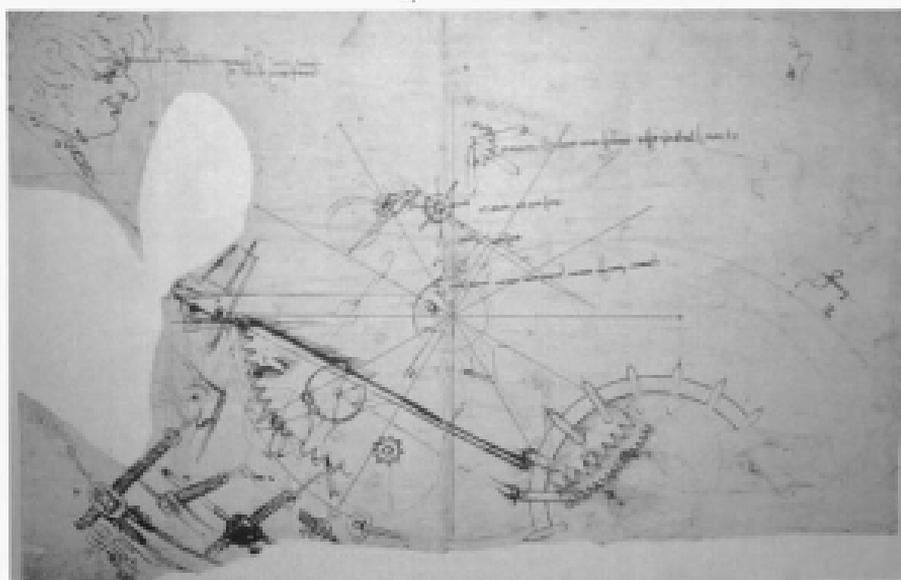
12. Leonardo da Vinci, *I disegni di Leonardo da Vinci e della sua cerchia nel Gabinetto disegni e stampe della Galleria degli Uffizi a Firenze*, n. 43 r [4073 A r] (particolari).



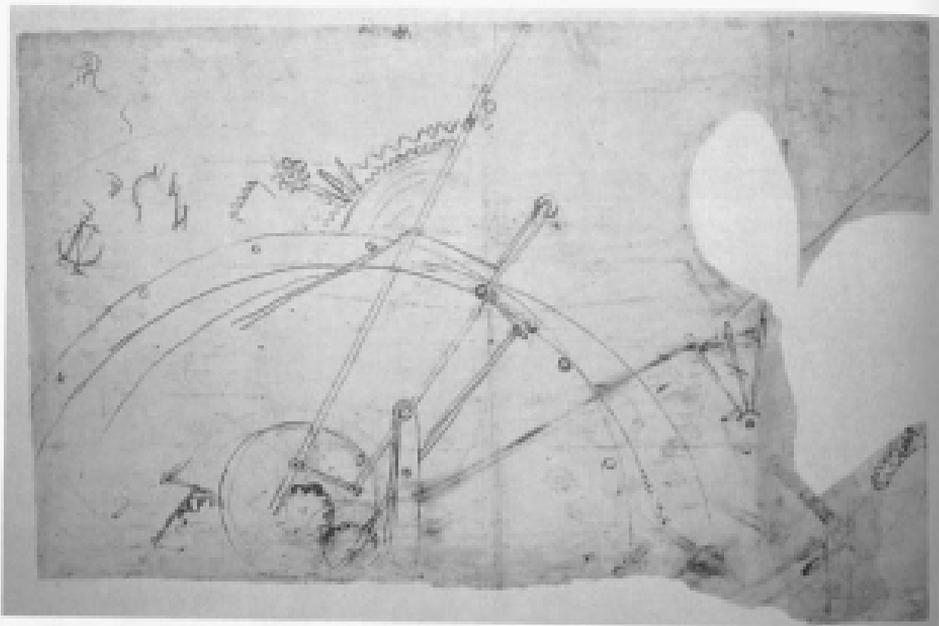
14

14. Leonardo da Vinci, *Il Coffer Attentivo della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, L. 812 v [296 v-4].

15. Leonardo da Vinci, *Il Coffer Attentivo della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, L. 878 v [310 v-4].



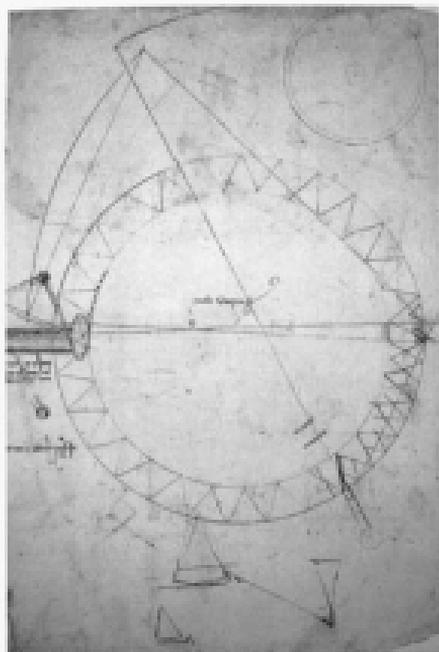
15



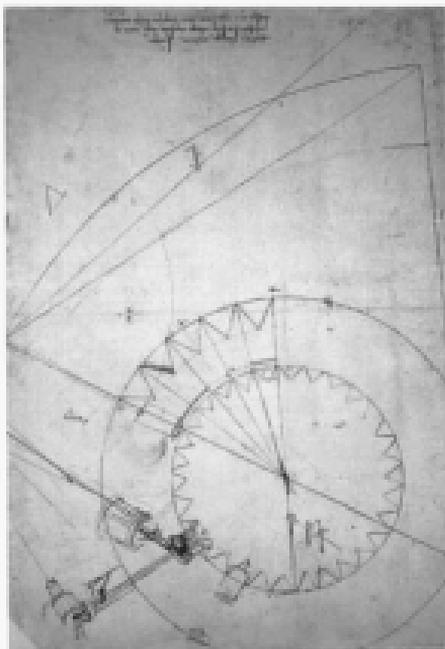
64



65



26



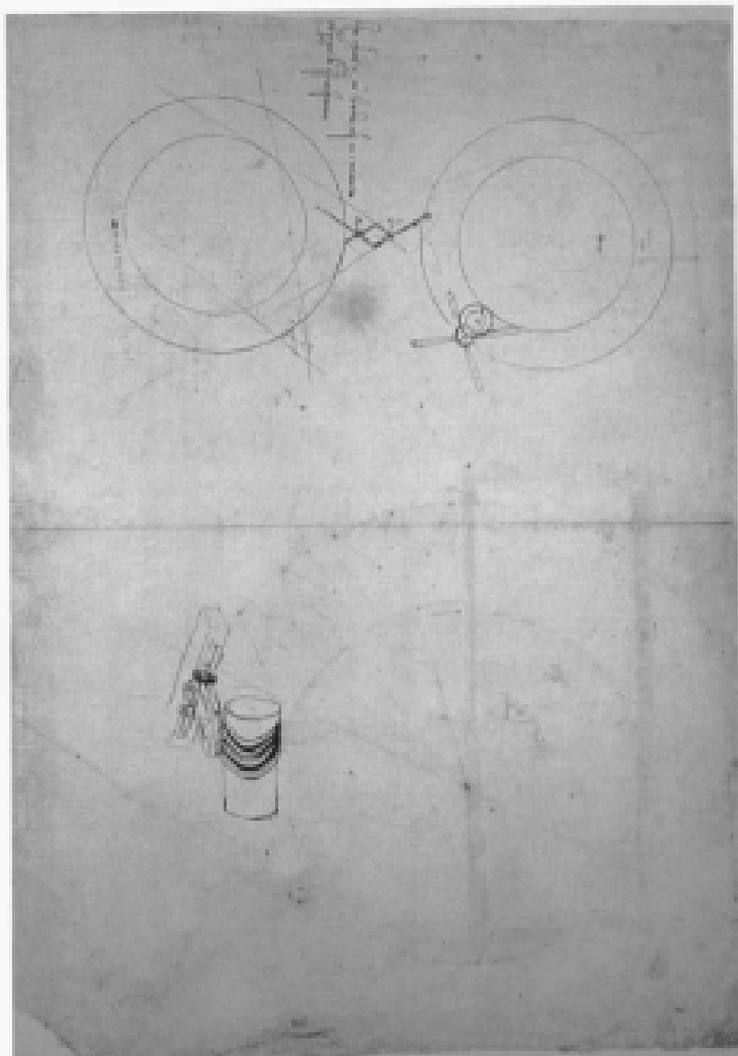
27

26. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 878 r [320 r-4].

27. Leonardo da Vinci, *I disegni di Leonardo da Vinci e della sua cerchia nel Gabinetto disegni e stampe della Galleria degli Uffizi a Firenze*, n. 7 r [446 II-r].

28. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 926 r [139 r-4].

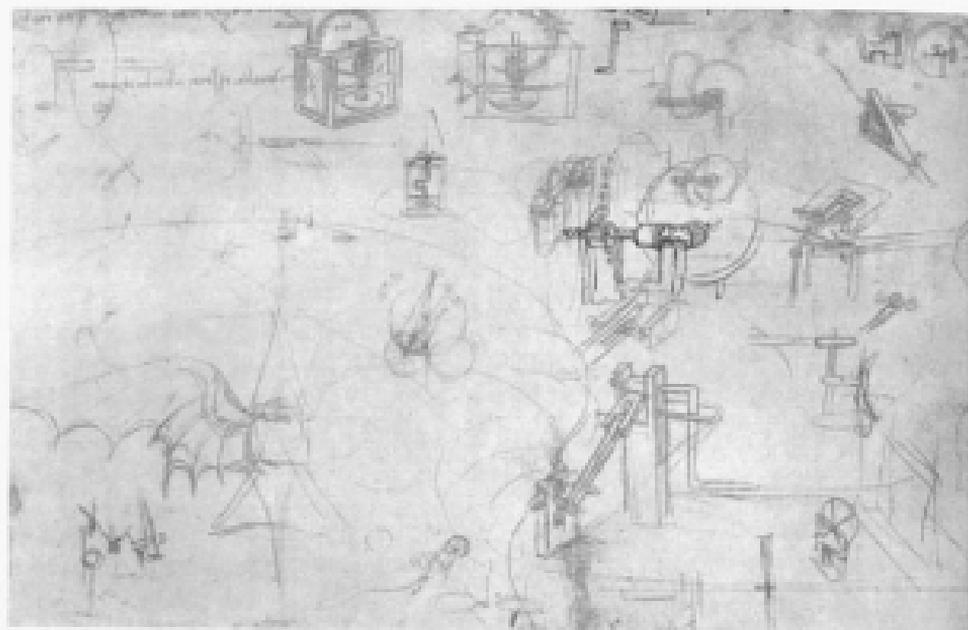
29. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 956 r [147 r-6].



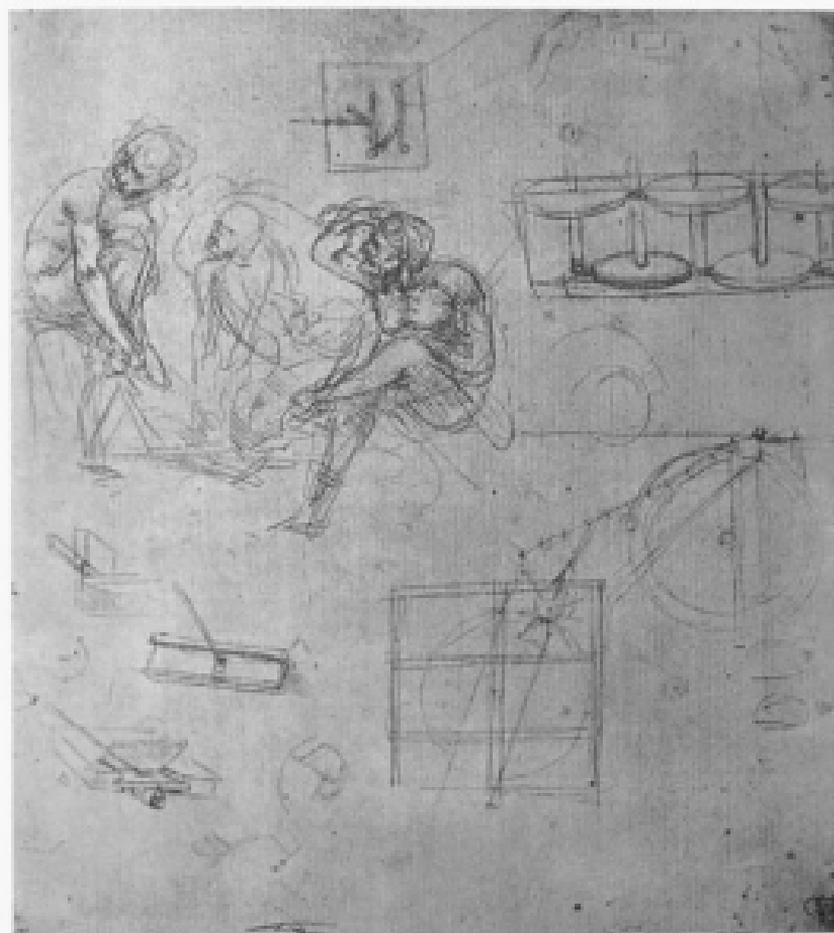
50. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 91r v (147 v-b).



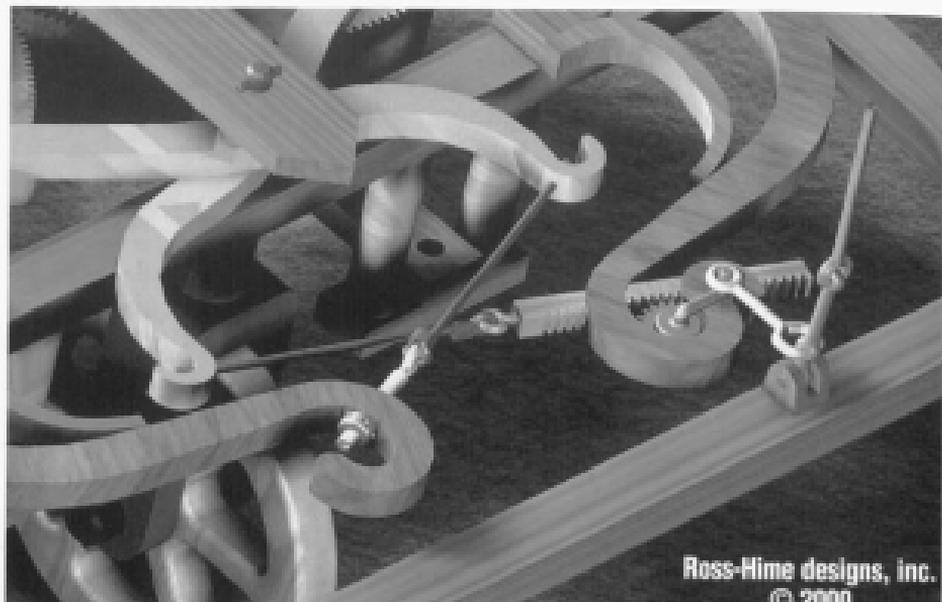
31. Leonardo da Vinci, *I disegni di Leonardo da Vinci e della sua macchina nel Gabinetto disegni e stampe della Galleria degli Uffizi a Firenze*, n. 97 (147 E-C).



38. Leonardo da Vinci, *I disegni di Leonardo da Vinci e della sua eredità nel Gabinetto disegni e stampe della Galleria degli Uffizi a Firenze*, n. 9 v [447 E-v].

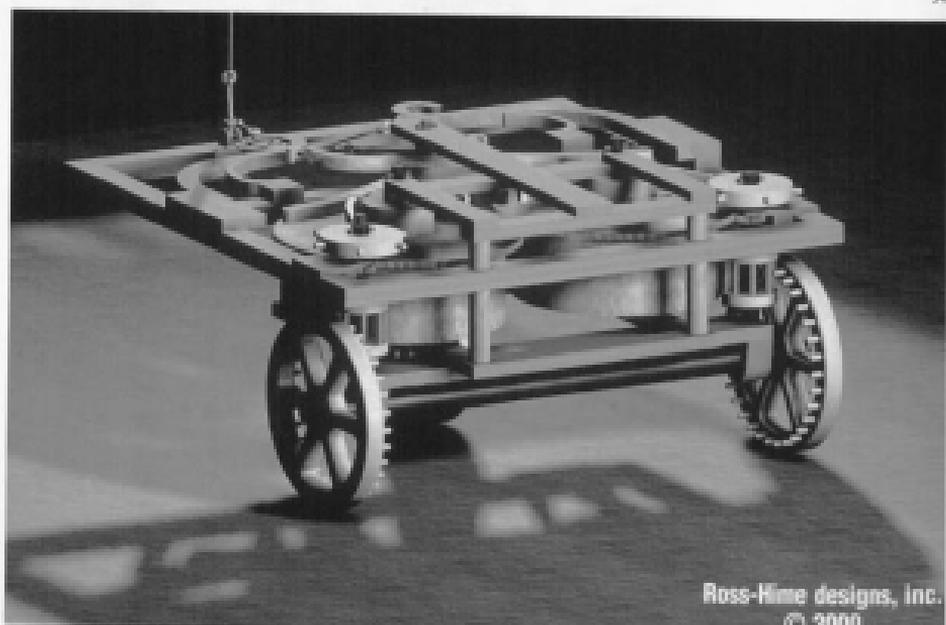


32. E.T. Parker, *Catalogue of the Collection of Drawings in the Ashmolean Museum*, Plate 28 (VII): Leonardo da Vinci, *Studies of Figures and of Machinery*



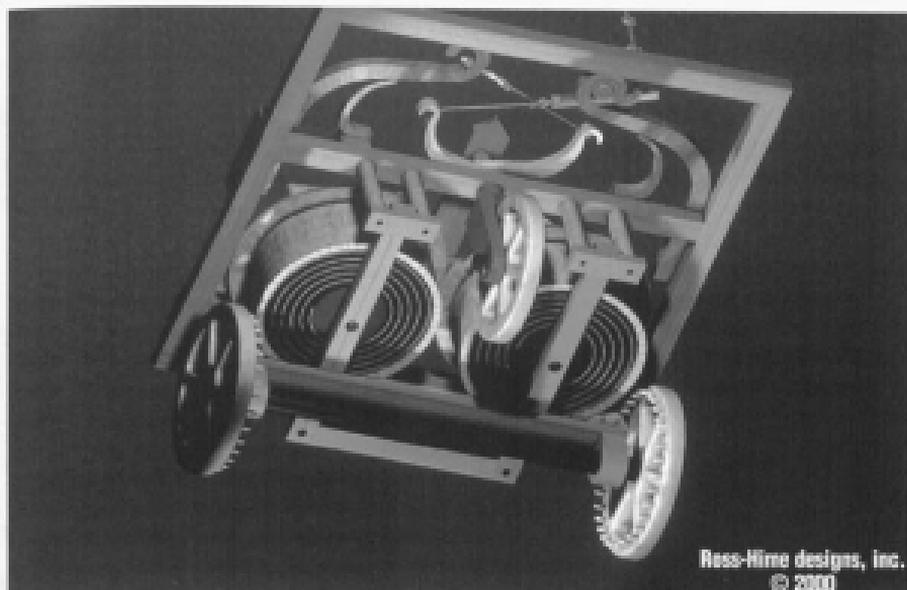
Ross-Hime designs, inc.
© 2000

34



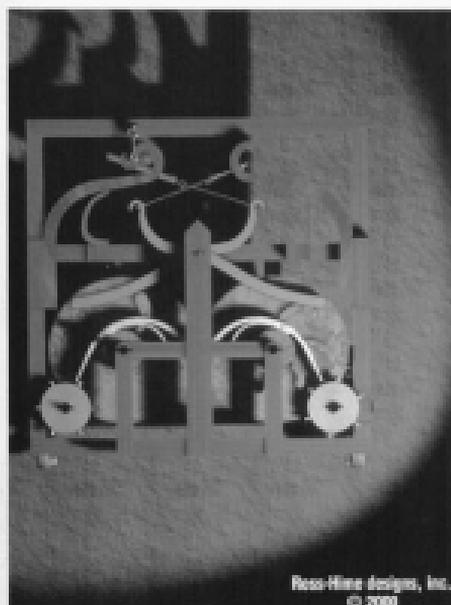
Ross-Hime designs, inc.
© 2000

35



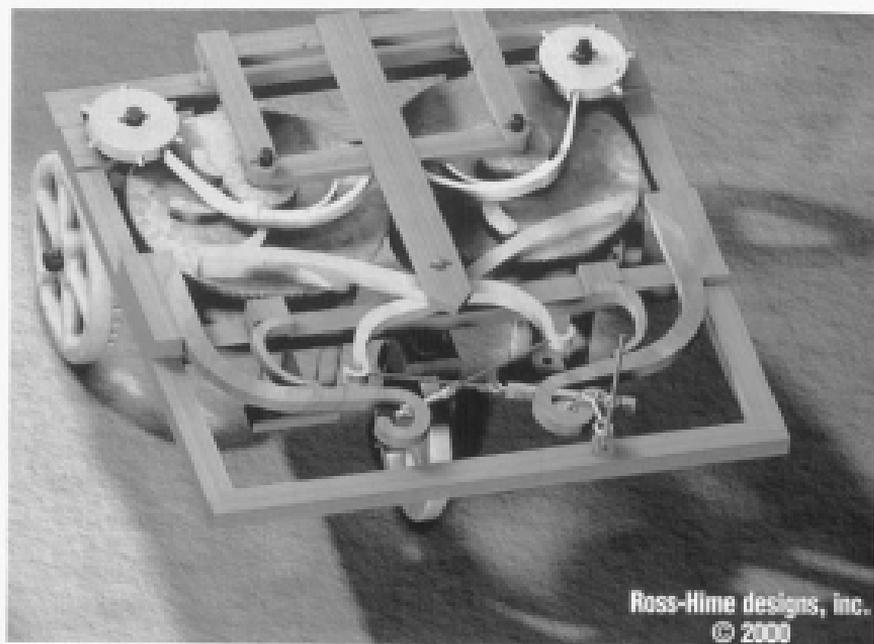
Reco-Hirre designs, inc.
© 2000

14

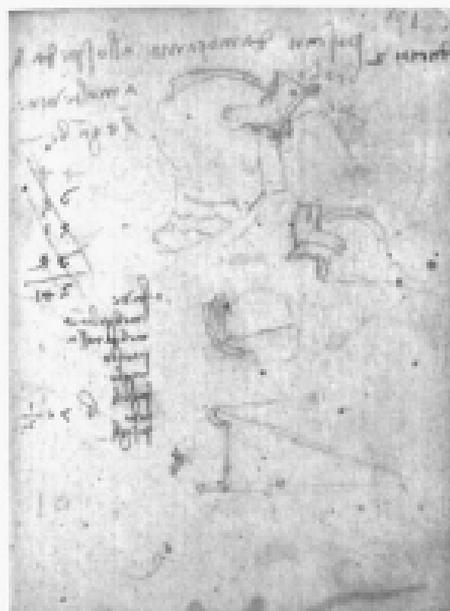


Reco-Hirre designs, inc.
© 2000

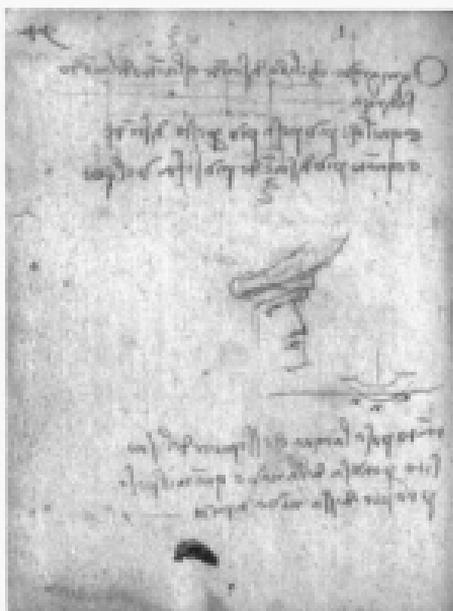
14. Vista anterior del carrello programmabile per automi.
 15. Vista posteriore del carrello programmabile per automi.
 16. Vista dal basso del carrello programmabile per automi.
 17. Vista dall'alto del carrello programmabile per automi.



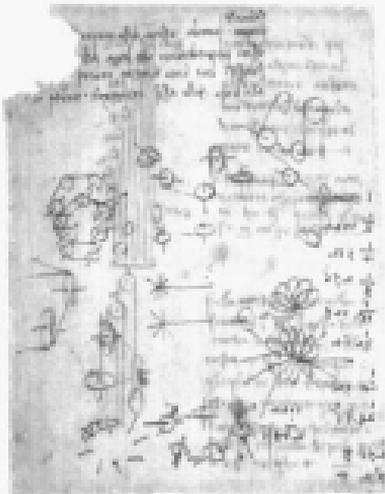
38. Vista di tre quarti del carrello programmabile per automi.



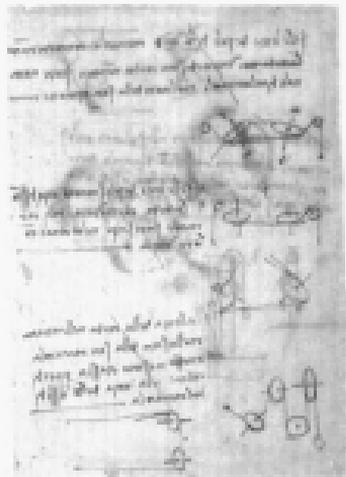
39



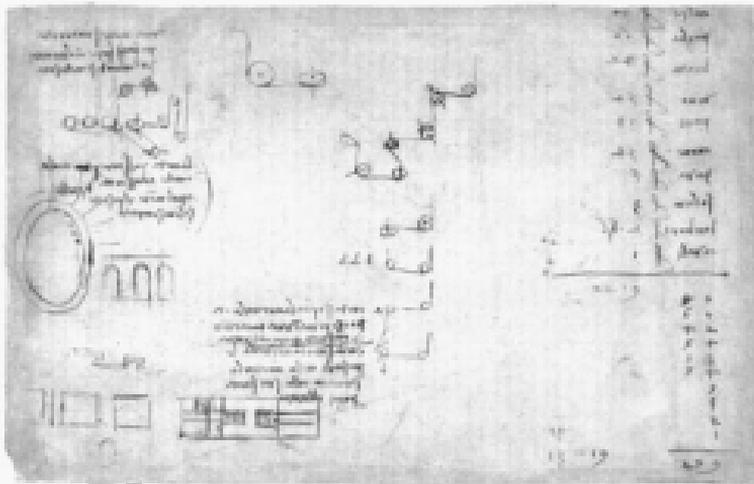
40



42



43



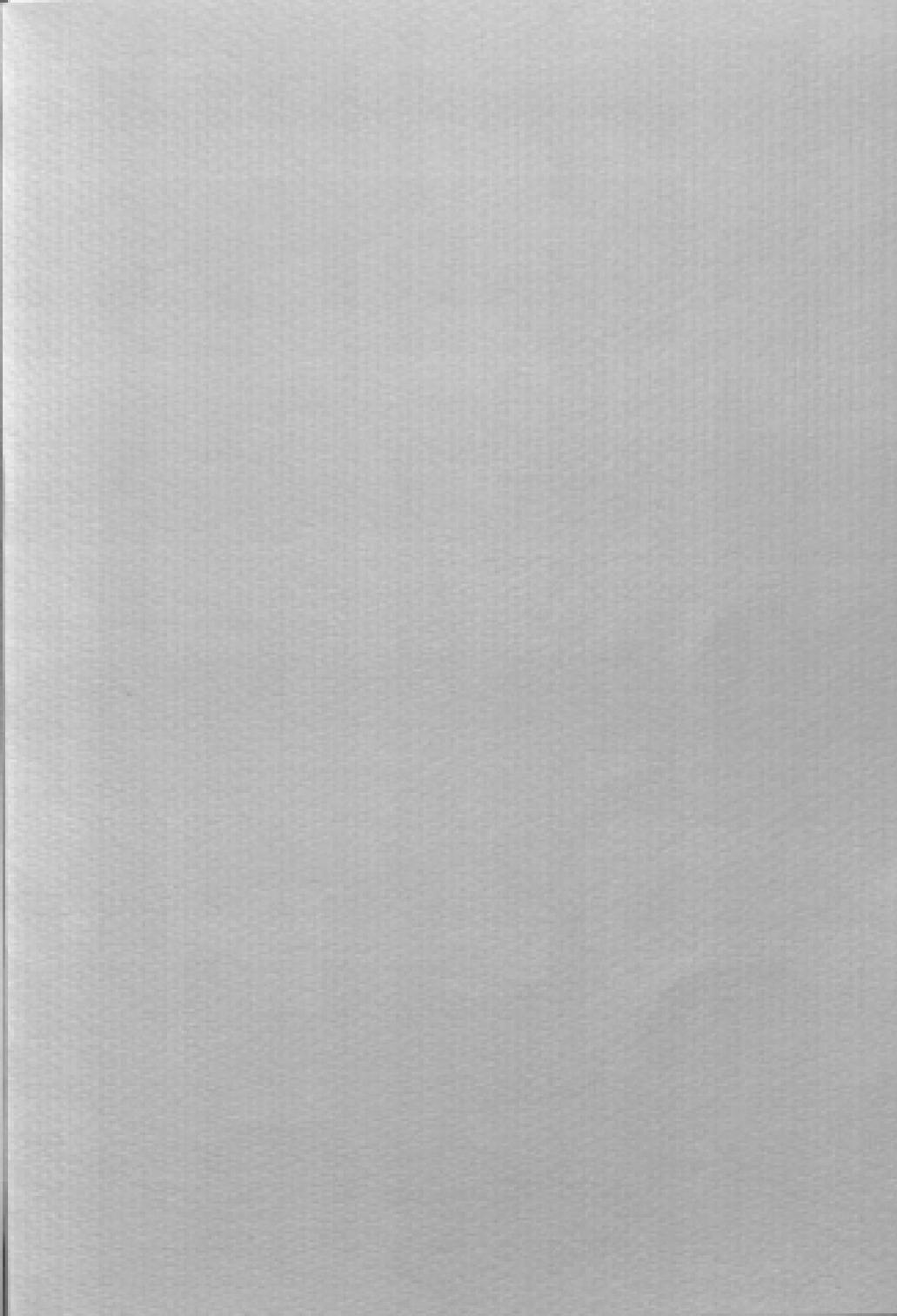
44

42. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 350a r (110 r-b).

43. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 350b r (110 r-c).

44. Leonardo da Vinci, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, f. 369 r (134 r-b).

Printed in Italy in April 2001
presso Litani Industrie Grafiche S.p.A.
Stabilimento di Pinerolo



CM 31625-4

0199 00-00-01100-4



L 30,000 415,40