BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čtyřsektorové elektrodové pole pro dielektroforézu

Jakub Drs

České vysoké učení technické v Praze

Vedoucí práce: Ing. Jiří Zemánek

České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická Katedra řídicí techniky

Praha, 2012

České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jakub Drs

Studijní program: Kybernetika a robotika Obor: Systémy a řízení

Název tématu: Čtyřsektorové elektrodové pole pro dielektroforézu

Pokyny pro vypracování:

Proveďte oživení a testování nově navrženého elektrodového pole (tzv. čtyřsektorové pole), které je určeno pro bezkontaktní manipulaci s mikroskopickými objekty pomocí dielektroforézy. Toto pole následně využijte jako základ aparatury pro mezinárodní soutěž mikrorobotů NIST MMC 2012. Hlavní úkoly práce jsou jmenovitě:

1. Návrh konektoru pro elektrodové pole, který bude zajištovat mechanické zafixování a vytvářet kontakt pro připojení vícekanálového generátoru.

2. Dokončení konstrukce 64-kanálového generátoru - osazení zbývajících součástek, finální úpravy elektroniky, naprogramování hradlového pole a vytvoření rozhraní pro řízení z Matlabu.

 Návrh algoritmů a experimenty s řízením elektrodového pole bez zpětné vazby. Zejména nalezení a testování pracovních režimů elektrodového pole, které budou generovat různé trajektorie objektů.

4. Ověření možností využití pole pro planární manipulaci, kdy by se požadované trajektorie dosáhlo pomocí skládání abecedy základních pohybů.

Seznam odborné literatury:

[1] M. P. Hughes. Nanoelectromechanics in Engineering and Biology. Nano- and Microscience, Engineering, Technology and Medicine. CRC Press, 2003.

[2] T. B. Jones. Electromechanics of Particles. Cambridge University Press, October 1995.

[3] T. B. Jones. Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 22(6):33-42, 2003.

[4] R. Pethig. Dielectrophoresis: Status of the theory, technology, and applications. Biomicrofluidics, 4(2):022811, 2010.

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2012/2013

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc. vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. děkan

V Praze dne 19. 1. 2012

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím dielektroforézy pro manipulaci s malými objekty. K tomuto účelu využíváme polystyrenové kuličky o velikostech od 10 do 250 μ m ponořené do deionizované vody. K vyvolání dielektroforézy slouží nově navržené čtyřsektororvé elektrodové pole. Koncept tohoto pole umožňuje širokou škálu planárních pohybů při nízkých výrobních nárocích.

Práce se zaměřuje především na instrumentaci a návrh strategie řízení. Navržený princip byl následně demonstrován při účasti v mezinárodní mikrorobotické soutěži NIST MMC 2012, pořádané v rámci konference IEEE International Conference on Robotics and Automation v St. Paul ve Spojených státech.

Abstract

This thesis deals with manipulation of small particles using dielectrophoresis. Polystyrene micro-beads ranging from 10 to $250 \,\mu\text{m}$ in diameter immersed in deionized water were used for experiments. A novel four-sector microelectrode array has been used. The layout of the array enables wide range of planar motions while keeping the the fabrication requirements low.

The focus of this thesis was on instrumentation and motion planning strategies. The designated principles were demonstrated at the international microrobotics competition NIST MMC 2012, which took place in St. Paul, USA at IEEE International Conference on Robotics and Automation.

Prohlášení

۶.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 24.5.2012

podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval celé své rodině za podporu v průběhu realizace této práce. Dále pak vedoucímu své práce Jiřímu Zemánkovi za vstřícný přístup, cenné rady a podporu během práce. V neposlední řadě také Zdeňku Hurákovi za zprostředkování cesty do Spojených států na soutěž mikrorobotů.

Obsah

1.	Motivace a cíle	1
2.	Dielektroforéza 2.1. Matematický popis dielektroforézy	3 4 4 8
3.	Experimentální platforma 3.1. 64-kanálový generátor 3.1.1. Popis komunikace 3.2. Propojovací konektor pro čtyřsektorové pole	15 15 17 18
4.	Soutěž mikrorobotů MMC4.1. Zadání soutěže4.2. Výroba soutěžního elektrodového pole	21 21 21
5.	Návrh řízení5.1. Možné strategie řízení5.1.1. Řízení pomocí pozitivní dielektroforézy5.1.2. Řízení pomocí negativní dielektroforézy5.1.3. Řízení pomocí dielektroforézy postupnou vlnou5.2. Použitá strategie řízení5.3. Projetí osmičky na herním poli5.3.1. Vertikální pohyb5.3.2. Pohyb po diagonále5.3.3. Průchod brankou5.3.4. Sestavení celé dráhy5.5. Praktické poznatky	 25 25 25 26 26 27 28 28 28 29 29 30
6.	Závěr	33
Α.	Obsah přiloženého CD	I

Seznam obrázků

1.1.	Čtyřsektorové elektrodové pole
2.1.	Koule ve sférických souřadnicích 6
2.2.	Numerická simulace rozložení potenciálu v děleném dielektriku . 8
2.3.	Rozložení potenciálu v kouli
2.4.	Dipól v elektrickém poli
2.5.	Ilustrační obrázek dielektroforézy
3.1.	Experimentální aparatura pro dielektroforézu s čtyřsektorovým elektrodovým polem
3.2.	Blokové schéma generátoru
3.3.	Propojovací konektor pro čtyřsektorové elektrodové pole 19
4.1.	Elektrodové pole určené pro soutěž
4.2.	Sestavená aparatura pro účast v soutěži
5.1.	Základní princip řízení
5.2.	Vertikální pohyb
5.3.	Pohyb po diagonále
5.4.	Přechod přes střed pole
5.5.	Průchod brankou
5.6.	Projetí dráhy dle zadání soutěže

1. Motivace a cíle

Hlavním cílem mé práce bylo oživit a otestovat čtyřsektorové elektrodové pole pro dielektroforézu vyrobené vedoucím mé práce Jiřím Zemánkem. Čtyřsektorové pole je soustava planárních zlatých elektrod na skleněné destičce viz obrázek 1.1 umožňující bezkontaktní manipulaci s mikroskopickými objekty pomocí dielektroforézy. Na toto pole se umístí bazének z polymeru, do kterého se nalije vhodné médium např. deionizovaná voda s mikroskopickými kuličkami, či jinými objekty. Pomocí různých signálů, přiváděných na elektrody, lze poté těmito objekty pohybovat. Toto pole teoreticky umožňuje přemísťování objektů na libovolná místa, avšak ne po libovolných drahách. Hlavním cílem mé práce bylo tedy nalézt základní abecedu pohybů, kterých lze dosáhnout na tomto poli a ze kterých bude možné sestavit dráhu mezi libovolnými body.



Obrázek 1.1.: Čtyřsektorové elektrodové pole: (a) fotografie pořízená běžným fotoaparátem, (b) schématický nákres s naznačenými pohyby, (c) pohled na pole přes zvětšovací objektiv kamery

Pro generování signálů přiváděných na elektrody jsem měl k dispozici 64kanálový generátor, zkonstruovaný přímo pro tento účel. Bylo však zapotřebí, provést několik drobných úprav v zapojení a napsat nový firmware. Na tom jsem pracoval v rámci svého individuálního projektu. Zde uvedu pouze stručný popis funkce generátoru pro lepší pochopení způsobu řízení a za účelem dokumentace.

Pro efektivní návrh řízení je třeba vyjít z fyzikální podstaty dielektroforézy. Protože však tento jev nebývá pro elektrotechniky příliš známý, uvedu v rámci této práce pro pohodlí čtenáře také odvození základního vztahu pro dielektroforézu. Toto odvození jsem sebral z několika zdrojů a pokusím se ho přehledně okomentovat.

Velkou motivací mé práce byla možnost bezprostředně využít získané poznatky pro účast v mezinárodní soutěži mikrorobotů NIST MMC 2012. Za účelem účasti v soutěži jsme založili tým spolupracující na tomto projektu. Jeho dalšími členy byli Adam Hamr, Josef Müller a Václav Endrych. Společně bylo naším cílem vytvořit programové vybavení pro komunikaci s generátorem. Dále pak navrhnout nové elektrodové pole vyhovující zadání soutěže, vybrat vhodnou technologii výroby a nechat ho vyrobit. Podmínkou účasti v soutěži bylo také splnění kvalifikace, v podobě demonstrace řešení zadaného jednoduchého úkolu. V případě úspěšné kvalifikace se zúčastníme i samotné soutěže. Ta se letos koná v Minneapolis - St. Paul ve Spojených státech.

2. Dielektroforéza

Dielektroforéza není nikterak nový fenomén. Je známa již od roku 1951, kdy Herbert A. Pohl publikoval první článek na dané téma. Jde o elektrostatickou sílu působící na nenabité částice v nehomogenním elektrickém poli. Princip je takový, že každý materiál umístěný do elektrického pole se nějakým způsobem polarizuje. To zjednodušeně znamená, že se kladné a záporné náboje uvnitř molekul, které se bez účasti vnějšího elektrického pole kompenzují, od sebe vzdálí a vytvoří jakýsi elektrický dipól. Vnější elektrické pole poté na každý z těchto nábojů působí elektrostatickou silou. Pokud je toto pole homogenní, mají obě síly stejnou velikost, vzájemně se odečtou a výslednice je nulová. Avšak pokud je vnější pole nehomogenní, působí na oba náboje různé síly, jejichž výslednice je nenulová. Na daný materiál tedy působí síla rovná této výslednici. Pohyb, který taková síla způsobí nazýváme dielektroforéza.

V praxi je dielektroforetická síla poměrně malá. V běžném světě kolem nás se téměř neprojevuje. Využití nachází v laboratorním prostředí, kde se jí užívá k pohybování s mikroskopickými objekty ponořenými do vhodného média. Naše aparatura tedy vypadá tak, že máme sklíčko se zlatými elektrodami,na které se nalepí bazének z polymeru. Do bazénku se nalije deionizovaná voda a do té se nasypou mikroskopické kuličky. Přiváděním různých signálů na elektrody pole jsme poté schopni s kuličkami pohybovat. Protože je voda v přímém kontaktu s elektrodami, používáme pro řízení střídavé obdélníkové signály o frekvenci nad 10 kHz, aby nevznikala elektrolýza vody.

Fenomén dielektroforézy můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První z nich je konvenční dielektroforéza druhá je dielektroforéza postupnou vlnou a elektrorotace. Začněme nejprve u konvenční dielektroforézy. Ta funguje přesně tak, jak již bylo naznačeno na začátku kapitoly. Na elektrody pole stačí přivést stejnosměrné napětí a kuličky se začnou hýbat. Drobný problém spočívá v tom, že bezprostředně po přivedení napětí se potenciál rozloží v závislosti permitivitě prostředí a objektů. S ubíhajícím časem se však vlivem vodivostí potenciál opět přerozloží. Pro základní představu nám však postačí budeme-li pokládat vodivost za nulovou.

Z principu je jasné, že směr pohybu nebude záviset na polaritě přivedeného napětí, ale pouze na tvaru elektrického pole. V bezeztrátovém prostředí bude tedy konvenční dielektroforéza působit zcela stejně pro střídavé i stejnosměrné napětí přiváděné na elektrody.

Z pozorování víme, že směr pohybu není stejný pro různé kombinace elek-

trických vlastností předmětu a média. Pro některé kombinace jsou předměty přitahovány do míst s vysokým gradientem elektrického pole, pro jiné jsou naopak z těchto míst odpuzovány (záleží na vodivosti a permitivitě obou prostředí i na přivedené frekvenci). Konvenční dielektroforézu proto ještě dělíme na pozitivní a negativní podle toho, zda se předměty pohybují směrem k vysokému, či nízkému gradientu pole.

Druhou velkou skupinou je dielektroforéza postupnou vlnou a elektrorotace. Ta funguje na odlišném principu. V podstatě lze její chování přirovnat k asynchronnímu motoru. Vlivem střídavého elektrického pole se v kuličce vytvoří dipólový moment. Ten má však vzhledem k elektrickému poli fázové zpoždění. Interakce elektrického pole s tímto dipólem způsobuje, že se objekt buď roztočí (jako asynchronní motor) nebo se začne pohybovat ve směru gradientu fáze. Současně s dielektroforézou postupnou vlnou však vždy působí i dielektroforéza konvenční.

Využití dielektroforézy můžeme hledat např. v mikrobiologii, kde se jí užívá k separaci buněk, lze ji využít k třídění mikroskopických objektů na základě různých permitivit nebo přímo k manipulaci s objekty, což je právě náš případ.

2.1. Matematický popis dielektroforézy

V této kapitole uvedu matematické odvození konvenční dielektroforézy v bezeztrátovém prostředí za pomoci metody efektivního momentu. Pochopení tohoto vztahu je totiž klíčem k chápání dielektroforetické síly a umožní představu dějů nad elektrodovým polem a efektivní návrh řízení.

Převážně budu vycházet z knihy od Jonese [1], kde je toto odvození provedeno. Některé kroky v této knize však nejsou na první pohled zcela jasné a není zde například přehledně rozlišeno mezi maticovým a skalárním násobením. Pokusím se tedy v této kapitole, pro pohodlí čtenáře, odvození z této knihy lépe okomentovat a doplnit o několik dalších souvislostí získaných převážně z [2]. Zachovám však konzistenci s knihou od Jonese [1], co se týče odvozených vztahů i fyzikálních konstant.

2.1.1. Rozložení elektrického pole

Prvním zřejmým problémem je samotné elektrické pole generované elektrodami. Vzhledem k tomu, že se v nejjednodušším případě zajímáme o statický příklad, můžeme využít Gaussův zákon v elektrostatickém tvaru

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \,. \tag{2.1}$$

Navíc můžeme předpokládat, že samotným dielektrikem elektrické pole pouze prochází a žádné nevzniká. Divergence je zde tedy nulová

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0. \tag{2.2}$$

Bohužel rozložení náboje na elektrodách obecného tvaru obvykle není známé. Můžeme však využít potenciálu, který na elektrodách známe. Za předpokladu, že jsou elektrody dokonale vodivé, což v našem případě zlatých elektrod dost dobře platí, bude potenciál na nich roven přiloženému napětí. Vztah mezi polem a jeho potenciálem je všeobecně známý

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi \,. \tag{2.3}$$

Dosazením do vztahu (2.1) získáme následující diferenciální rovnici pro rozložení potenciálu v homogenním dielektriku

$$\operatorname{div}(\nabla\Phi) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\Phi = 0.$$
 (2.4)

Po rozepsání diferenciální formy zjistíme, že jde o Laplaceovu rovnici, která se obvykle zapisuje v následujícím tvaru, pomocí Laplaceova operátoru

$$\Delta \Phi = 0. \tag{2.5}$$

Pokud tedy chceme znát rozložení potenciálu musíme vyřešit tuto rovnici s okrajovými podmínkami potenciálu na povrchu elektrod. Její analytické řešení je však známo jen pro několik triviálních symetrických rozložení elektrod. Příkladem může být dvojice nekonečných rovnoběžných rovinných elektrod nebo dvojice kulové a rovinné elektrody. Ve většině případů je však nutné ji řešit numericky. Pakliže je navíc nutné řešit ji ve třech dimenzích, je toto řešení výpočetně velmi náročné.

Celá situace se ještě značně komplikuje tím, že předmět, kterým chceme za pomocí dielektroforézy pohybovat, musí být v určitém prostředí. Tím může být například vakuum, nebo v našem případě deionizovaná voda. V každém případě má ale toto prostředí odlišnou permitivitu od pohybujícího se předmětu. V tomto případě platí Laplaceova rovnice uvnitř obou dielektrik, ale ne na jejich rozhraní, kde se vytvoří plošný náboj. I v tomto případě získáme rozložení potenciálu řešením Laplaceovy rovnice, ale navíc musíme přidat dvě podmínky. První pro spojitost potenciálu podél rozhraní, kterou zapíšeme vztahem

$$\Phi_1 = \Phi_2; \{r = R\}.$$
(2.6)

Druhá podmínka je taková, že kolmá složka elektrické indukce $\mathbf{D}_{\mathbf{n}}$ v místě rozhraní (kolmá k ploše rozhraní) musí být též spojitá. Tato podmínka je dána rovnicí

$$\mathbf{D_{n1}} = \mathbf{D_{n2}}; \{r = R\}.$$
 (2.7)



Obrázek 2.1.: Elektrické pole ve sférických souřadnicích. (Střed koule splývá se středem souřadnicové soustavy, i když tomu tak na obrázku není)

V některých symetrických případech můžeme řešit Laplaceovu rovnici pro menší počet dimenzí, což nám výrazně ušetří práci. Uvedu zde řešení jednoho konkrétního příkladu, protože z něho vychází metoda efektivního momentu pro výpočet dielektroforetické síly.

Mějme homogenní dielektrikum o permitivitě ε_1 . Toto dielektrikum je lineárně polarizované ve směru osy z. Do tohoto dielektrika nyní vložíme kouli o poloměru R a permitivitě ε_2 tak, že její střed splývá se středem souřadnicové soustavy viz obrázek 2.1.

Vzhledem ke kulové symetrii použijeme sférické souřadnice $\Phi(r, \varphi, \theta)$. Z povahy úlohy vyplývá, že bude rotačně symetrická a tedy derivace podle úhlu θ bude vždy nulová. To nám umožní řešit úlohu pouze ve dvou dimenzích a sférické souřadnice budou odpovídat souřadnicím polárním $\Phi(r, \varphi)$. Je však potřeba dát pozor na Laplaceův operátor. Ten musí být stále vyjádřen ve sférických souřadnicích

$$\Delta f(r,\varphi,\theta) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial f}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} \,. \tag{2.8}$$

Laplaceova rovnice má v tomto případě dokonce exaktní řešení. Okrajovou podmínkou bude pro nás potenciál v nekonečnu, který musí odpovídat původní lineární polarizaci

$$\Phi(r \to \infty, \varphi) = -E_0 r \cos \varphi \,. \tag{2.9}$$

Analytickým postupem řešení Laplaceovy rovnice se zde zabývat nebudeme. To je popsáno např. v ref:Haus-Melcher. Spokojíme se pouze s jejím řešením z [1]. Pokud bychom si ho chtěli ověřit, stačí ho dosadit zpět do Laplaceovy rovnice 2.8 a ověřit si, že platí

$$\Phi_1 = -E_0 r \cos \varphi + \frac{A \cos \varphi}{r^2}; \{r > R\}$$
(2.10)

$$\Phi_2 = Br \cos \varphi; \left\{ r < R \right\}. \tag{2.11}$$

Laplaceova rovnice nám poskytne v tomto případě pouze tvar řešení. Neznámé koeficienty A a B musíme určit z podmínek (2.6) a (2.7). První podmínka je snadná. Po rozepsání do polárních souřadnic můžeme psát vztah

$$-E_0 R \cos \varphi + \frac{A \cos \varphi}{R^2} = BR \cos \varphi \,. \tag{2.12}$$

Druhá podmínka už tak jasná není. První věc kterou můžeme udělat je přepsat elektrickou indukci pomocí vztahu pro lineárně polarizovatelné dielektrikum

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \tag{2.13}$$

$$\varepsilon_1 \mathbf{E_{n1}} = \varepsilon_2 \mathbf{E_{n2}} \,. \tag{2.14}$$

Složku kolmou k povrchu kružnice však v polárních souřadnicích získáme celkem snadno. Je to přímo souřadnice r. Zbývá tedy již akorát dosadit za elektrickou intenzitu \mathbf{E} ze vztahu pro potenciál (2.3). Operátor gradientu si však nejprve vyjádříme v polárních souřadnicích

$$\nabla \mathbf{f}(r, \Phi) = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial r}, \frac{1}{r}\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \Phi}\right).$$
 (2.15)

Po dosazení první složky vektorové veličiny získáme potřebnou rovnici

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} \bigg|_{r=R} = \varepsilon_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \bigg|_{r=R}$$
(2.16)

$$\varepsilon_1(-E_0 - \frac{A}{-R})\cos\varphi = \varepsilon_2 \frac{B}{R}\cos\varphi.$$
 (2.17)

Vyřešíme-li soustavu rovnic (2.14) a (2.17), získáme neznámé koeficienty A a B

$$A = -\frac{R^3 E_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$$
(2.18)

$$B = \frac{3E_0 R\varepsilon_a}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$
(2.19)

7

Tím je celá úloha vyřešena. Pokud bychom navíc potřebovali znát přímo elektrické pole **E**, vypočteme ho pouze jako gradient potenciálu. Výsledek kterého jsme dosáhli ilustrují obrázky 2.2(a) a 2.2(b). Jak je vidět dielektrikum uvnitř koule se polarizuje lineárně narozdíl od dielektrika okolo, jehož původně lineární polarizace se zdeformovala. To, že je polarizace vnitřního dielektrika lineární není obecný případ, je to dáno pouze rotační symetrií. Obrázky 2.2(c) a 2.2(d) ukazují, jak vypadá polarizace kvádru namísto koule. Jak se rozloží potenciál v uvnitř i vně koule ukazuje ve 3D obrázek 2.3.



Obrázek 2.2.: Numerická simulace rozložení potenciálu, získaná v programu Comsol: ε_1 je permitivita prostředí a ε_2 je permitivita předmětu

2.1.2. Popis dielektroforetické síly

Nyní se přesuneme k problému, jak elektrické pole generované elektrodami působí na kuličku ve vodě. V obecném případě je to značně komplikovaná úloha, neboť elektrické pole je různé v každém bodě prostoru a každý atom můžeme považovat za elementární dipól na který působí různá síla. Jakýsi zjednodušený pohled na danou problematiku nabízí hojně využívaná metoda efektivního momentu. Ta pro většinu případů poskytuje uspokojivé výsledky a zároveň je poměrně jednoduchá.



Obrázek 2.3.: Rozložení potenciálu v kouli: Dvě izoplochy elektrického potenciálu procházející koulí.



Obrázek 2.4.: Elektrický dipól v nelineárním elektrickém poli. (Překresleno z [1])

2. Dielektroforéza

Začněme však nejprve zcela od začátku. Mějme elektrický dipól složený ze dvou stejně velkých opačných nábojů viz obrázek 2.4. Polohový vektor **r** ukazuje na pozici náboje -q, vektor **d** určuje vzájemnou polohou obou nábojů. Síla působící na dipól je součtem sil působících na každý náboj. Můžeme tedy pro ni napsat rovnici

$$\mathbf{F} = -q\mathbf{E}(\mathbf{r}) + q\mathbf{E}(\mathbf{r} + \mathbf{d}). \qquad (2.20)$$

V této chvíli můžeme použít Taylorův rozvoj pro vektorové pole. Ten se formálně zapisuje v následujícím tvaru

$$\mathbf{F}(\mathbf{r} + \mathbf{d}) = \mathbf{F}(\mathbf{r}) + \nabla \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{d} + \dots \qquad (2.21)$$

Symbol ∇ je zde použit poněkud nezvykle. Obvyklé je jím značit gradient skalárního pole, zde je však pole vektorové. Jde však pouze o malé zobecnění. Vektorové pole není z matematického pohledu nic jiného než uspořádaná trojice skalárních polí. Symbol $\nabla \mathbf{F}$ zde značí příslušnou trojici gradientů. Formálně ho zapisujeme jako matici [3 × 3], která se nazývá Jacobiho a má následující tvar

$$\nabla \mathbf{F} = \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} & \frac{\partial F_x}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} & \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_z}{\partial x} & \frac{\partial F_z}{\partial y} & \frac{\partial F_z}{\partial z} \end{bmatrix}.$$
 (2.22)

Pokud rozvineme elektrické pole v Taylorovu řadu podle vektoru **d** a zanedbáme vyšší členy Taylorova rozvoje, získáme následující vztah pro sílu

$$\mathbf{F} = -q\mathbf{E}(\mathbf{r}) + q(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + [\nabla \mathbf{E}] \cdot \mathbf{d}) = q[\nabla \mathbf{E}] \cdot \mathbf{d}.$$
(2.23)

Jak vidíme síly závislé na neměnné složce elektrického pole se odečetly a síla je nyní závislá pouze na gradientu pole. To je logické, neboť dielektroforetická síla působí jen v poli, které se v prostoru mění.

Obvykle se ještě využívá vztahu pro dipólový moment

$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} \,. \tag{2.24}$$

Nyní již přichází na řadu metoda efektivního momentu. Ta vychází z řešení úlohy v minulé kapitole. Podívejme se pozorně na potenciál v dielektriku okolo kuličky. Ten má tvar

$$\Phi_1 = -E_0 r \cos \varphi + \frac{A \cos \varphi}{r^2}; r > R.$$
(2.25)

Můžeme si všimnout, že výsledný potenciál je součtem původního (lineárně polarizovaného) a nějakého nově vzniklého potenciálu, který má tvar

$$\Phi_{1n} = \frac{A\cos\varphi}{r^2} \,. \tag{2.26}$$

Ten ale odpovídá poli dipólového charakteru v polárních souřadnicích

$$\Phi_{dip} = p \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{\cos\varphi}{r^2} \,. \tag{2.27}$$

Porovnáním předchozích dvou vztahů (2.26) a (2.20) a dosazením za konstantu A vypočteme efektivní dipólový moment

$$p_{ef} = 4\pi R^3 \varepsilon_1 E_0 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \,. \tag{2.28}$$

Podíl kombinace permitivit má již ve fyzice své místo a je známý pod názvem Claussius-Mossotti faktor

$$K = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \,. \tag{2.29}$$

Vztah pro efektivní moment tedy vypadá následovně

$$p_{ef} = 4\pi R^3 \varepsilon_1 K \ E_0 \,. \tag{2.30}$$

Metoda efektivního momentu nyní uvádí následující představu. Vložení kuličky do původně lineárně polarizovaného dielektrika vytvoří okolo sebe dipólové pole. Namísto vložené kuličky si tedy můžeme představit dipól takového momentu, aby po vložení do původního lineárně polarizovaného dielektrika místo kuličky, vyvolal stejné dipólové pole. Na tento dipól potom působí původní elektrické pole.

Výhoda této představy je následující. Efektivní moment p_{ef} je nyní pouze lineární funkcí původní polarizace E_0 . Vektor efektivního momentu bude přímo úměrný elektrickému poli

$$\mathbf{p}_{ef} = 4\pi R^3 \varepsilon_1 K \mathbf{E} \,. \tag{2.31}$$

Síla působící na tento dipól bude úměrná gradientu elektrického pole

$$\mathbf{F} = [\nabla \mathbf{E}] \cdot \mathbf{p} \,. \tag{2.32}$$

Pokud tedy chceme znát dielektroforetickou sílu, musíme vypočíst z Laplaceovy rovnice rozložení potenciálu a elektrického pole. Laplaceovu rovnici ale řešíme pouze v homogenním dielektriku (nikoliv děleném) a žádnou další rovnici již nemusíme řešit, nebot síla je přímo funkcí elektrického pole **E**.

Rovnice (2.32) jde ještě o něco zjednodušit. V první řadě můžeme dosadit za dipólový moment. Do konstanty α pouze zahrneme všechny ostatní konstanty

$$\mathbf{F} = \alpha [\nabla \mathbf{E}] \cdot \mathbf{E} \,. \tag{2.33}$$

Je dobré vědět, že tuto rovnici je možné zapsat i v následujícím tvaru, kterým se vyhneme maticovému násobení

$$\mathbf{F} = (\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E} \,. \tag{2.34}$$

Nyní přichází poměrně netriviální krok neboť tuto rovnici můžeme zapsat i v následujícím tvaru

$$\mathbf{F} = \alpha \frac{1}{2} \nabla \mathbf{E}^2 \,. \tag{2.35}$$

K tomu nás opravňuje Maxwellova rovnice rot $\mathbf{E} = 0$. Rozepíšeme-li tuto rovnici po složkách získáme následující tři rovnosti

$$\partial_y E_z = \partial_z E_y \tag{2.36}$$

$$\partial_z E_x = \partial_x E_z \tag{2.37}$$

$$\partial_x E_y = \partial_y E_x \,. \tag{2.38}$$

Dále můžeme rozepsat po složkách vektor síly z rovnice (2.35)

$$\mathbf{F} = \alpha \begin{bmatrix} E_x \,\partial_x E_x + E_y \,\partial_x E_y + E_z \,\partial_x E_z \\ E_x \,\partial_y E_x + E_y \,\partial_y E_y + E_z \,\partial_y E_z \\ E_x \,\partial_z E_x + E_y \,\partial_z E_y + E_z \,\partial_z E_z \end{bmatrix} .$$
(2.39)

Pokud do této rovnice dosadíme ze vztahů (2.36),(2.37) a (2.38) zjistíme, že dostaneme původní rovnici (2.34).

Dostali jsme se tedy k finálnímu vztahu pro konvenční dielektroforézu v bezeztrátovém prostředí

$$\mathbf{F} = 2\pi R^3 \varepsilon_1 K \,\nabla \mathbf{E}^2 \,. \tag{2.40}$$

Nyní se z tohoto vztahu pokusíme vyvodit určité závěry. Jako první zmiňme podmínky, za kterých lze tuto metodu použít. Především toto odvození platí pouze v bezeztrátovém prostředí, tedy s nulovou vodivostí. V praxi ovšem prostředí vždy nějakou vodivost má. S rostoucí frekvencí však její vliv klesá a pro vysoké frekvence tento vztah přibližně platí. Dále je nutné, aby byl předmět dostatečně malý oproti nelinearitě pole. Jako krajní mez se obvykle udává velikost elektrody. Posledním omezením je to, že dipólový moment byl odvozen pro kouli. To naštěstí zcela odpovídá naší situaci.

Zajímavou vlastností je, že efektivní moment \mathbf{p}_{ef} může být orientovaný ve směru i proti směru elektrického pole \mathbf{E} v závislosti na poměru permitivit obou prostředí. To odpovídá pozitivní a negativní dielektroforéze. Nebo-li pokud bude permitivita kuličky ε_2 větší, než permitivita prostředí ε_1 , bude kulička přitahována do míst s vysokým gradientem a půjde o pozitivní dielektroforézu (K > 0). V opačném případě, kdy bude permitivita kuličky nižší než permitivita prostředí, bude kulička z míst s vysokým gradientem naopak vypuzována a půjde o negativní dielektroforézu (K < 0).

Pro účely řízení je důležitý obzvláště směr dielektroforetické síly. Obrázek 2.5 zobrazuje silové pole dielektroforézy vyvolané dvojicí rovnoběžných, nekonečně dlouhých elektrod v součtu s gravitačním polem. Tento model poměrně dobře ilustruje děje nad elektrodami pole.



Obrázek 2.5.: Silové pole vyvolané dvojicí rovnoběžných nekonečně tenkých, nekonečně dlouhých elektrod a gravitací

3. Experimentální platforma

Pro provádění experimentů s čtyřsektorovým elektrodovým polem bylo nejprve potřeba připravit experimentální platformu, kterou můžeme vidět na obrázku 3.1. Platforma sestává ze čtyř základních částí. Jádrem je 64-kanálový generátor připojený k PC. Dále je zde propojovací konektor mezi elektrodovým polem a generátorem a samotné elektrodové pole vyrobené na skleněné destičce. Poslední částí je kamera se zvětšovacím objektivem sloužící k pozorování dějů na elektrodovém poli. K sestavení a oživení celé platformy bylo potřeba provést několik kroků. Prvním z nich bylo oživení generátoru, které jsem provedl již v rámci svého individuálního projektu. Dále bylo potřeba vyřešit propojení elektrodového pole s generátorem. Původně se k tomuto účelu používaly upravené testovací kolíčky pro integrované obvody. Ty jsem však nakonec zavrhnul z důvodu velkého počtu vývodů čtyřsektorového pole a nepraktické manipulace. Zvolil jsem raději novou cestu miniaturních pozlacených pružinek. Posledním úkolem bylo navrhnout řídicí program pro počítač. Ten není přímo mou prací, ale vytvořili ho členové spolupracujícího týmu Josef Müller a Václav Endrych.

3.1. 64-kanálový generátor

Generátor je navržen pro buzení 64 kanálů fázově posunutými obdélníkovými signály. Na každý kanál je přiveden obdélníkový signál o 50% střídě. Fáze každého signálu je nastavitelná od 0 do 360° v 16 krocích. Krok tedy činí 22.5°. Všechny fáze, které je možné nastavit jsou uvedeny v tabulce 3.1. Společná frekvence všech signálů je nastavitelná dělením základního kmitočtu. Ten činí 3.125 MHz. Dělička dělí od 1 do 65536. Frekvenci je tedy možné nastavit od 47.7 Hz do 3.125 MHz. Funkci generátoru zachycuje blokové schéma na obrázku 3.2. Výstupy generátoru tvoří darlingtonovy tranzistory a pull-up rezistory. Maximální výstupní napětí generátoru je 20 V.

Jádrem generátoru je hradlové pole od firmy Xillinx. To je pro tuto úlohu více než vhodné, neboť je schopno pracovat synchronně se všemi piny naráz. To mikroprocesory obvykle neumožňují. Firmware proto bylo nutné napsat v jazyce vhdl. Pro komunikaci s počítačem byl zvolen jednoduchý protokol přes sériovou linku. Protokol je založený na abecedě příkazů, které jsou následovány přednastaveným množstvím dat.

$3. \ Experiment {\'aln} i \ platforma$



Obrázek 3.1.: Experimentální aparatura pro dielektroforézu s čtyřsektorovým elektrodovým polem

číslo	0	1	2	3	4	5	6	7
skutečná fáze	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
číslo	8	9	10	11	12	13	14	15
skutečná fáze	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°

Tabulka 3.1.: Nastavitelný fázový posuv generovaných signálů.



Obrázek 3.2.: Blokové schéma generátoru

3.1.1. Popis komunikace

Generátor podporuje pět příkazů. Ty se zasílají jako ASCII kód po sériové lince.

- shdn Příkaz slouží k vypnutí výstupu generátoru. Po jeho přijetí očekává generátor příkaz.
- wake Zapíná výstup generátoru. Po přijetí je očekáván příkaz.
- freq Slouží k zadání frekvence. Po přijetí očekává generátor dva byty pro nastavení děličky.
- data Po přijetí je očekáváno 32 bytů dat pro fázový posuv.
- **sync** Po přijetí příkazu sync jsou minulá přijatá data zapsána na výstup. Po přijetí je očekáváno dalších 32 bytů dat pro fázový posuv.

Aby nedocházelo ke ztrátě synchronizace mezi počítačem a generátorem, odpovídá generátor na každý přijatý znak jeho zpětným vysláním. Výjimkou je pouze správné přijetí příkazu, kdy generátor potvrdí příkaz nahrazením jeho posledního písmene písmenem "Y"(freY). Pokud naopak dojde k chybě při příjmu příkazu, generátor začne odpovídat písmenem "N", až do přijetí správného příkazu, který je opět potvrzen písmenem "Y"

(frxq 0x12 0x34 ... data 0x56 0x78 \rightarrow frxNNN...NNNY 0x56 0x78).

3.2. Propojovací konektor pro čtyřsektorové pole

Propojení elektrodového pole s generátorem je poměrně náročný problém. Kontaktovací plošky elektrodového pole jsou totiž jen několik desítek nm silné a jsou velmi náchylné na poškození. Pokusy o pájení přímo na plošky vedou obvykle k jejich zničení. Další možností je využití vodivých lepicích přípravků, nebo nějakého druhu mechanického kontaktu. Nakonec jsem zvolil mechanickou variantu. Důvodem bylo především nižší riziko poškození elektrodového pole a snadná rozebiratelnost.

Protože plošky elektrodového pole mají rozteč 2.54 mm rozhodl jsem se konektor vyrobit na předvrtaném univerzálním plošném spoji. K propojení s generátorem slouží obyčejné kolíkové lišty. Na kontaktování elektrodového pole jsem využil miniaturní pozlacené pružinky pocházející z konektoru pro paměť RAM. Do série s každou elektrodou jsem ještě připojil kondenzátor 100 nF pro odstranění případné stejnosměrné složky. Elektrodové pole je totiž velmi náchylné na vznik elektrolýzy vody, která ve většině případů vede k odloupnutí některé z elektrod. Ještě bylo potřeba vyrobit díl, který přitlačí elektrodové pole na své místo. Ten jsme vyřízli z umělé hmoty na CNC-frézce. Hotový konektor můžeme vidět na obrázku 3.3.

Při prvních testech na elektrodovém poli se ukázalo, že několik elektrod je vzájemně propojených. Problémem se ukázalo být samotné elektrodové pole. Na svislé hraně pole se při výrobě naprašováním vytvořila tenká vodivá vrstva propojující elektrody, kterou stačilo seškrábnout. Po této úpravě již téměř všechny elektrody fungují. Bohužel jedna elektroda stále zůstává nefunkční. Příčinu této závady se mi doposud nepodařilo určit.



Obrázek 3.3.: Propojovací konektor pro čtyřsektorové elektrodové pole

4. Soutěž mikrorobotů MMC

Praktickou ukázkou mé práce byla účast v mezinárodní soutěži mikrorobotů NIST MMC 2012. Za účelem účasti v této soutěži byl vytvořen tým čtyř členů, který spolupracoval na daném problému. Naším úkolem bylo vytvořit platformu a programové vybavení vhodné pro účast v soutěži, splnit kvalifikační podmínky a soutěže se zúčastnit.

Soutěž NIST Mobile Microrobotics Challenge 2012 je univerzitní soutěž, pořádaná letos v Minneapolis ve Spojených státech v rámci prestižní mezinárodní konference IEEE International Conference on Robotics and Automation. Klade si za cíl podpořit výzkum a vývoj mikrotechnologií na univerzitní úrovni. Hlavním účelem soutěže je demonstrace různých technologií schopných manipulace s mikroskopickými objekty.

4.1. Zadání soutěže

Soutěž zahrnuje dva úkoly. Prvním z nich (Mobility Challenge) je řízení pohybu robota po dráze ve tvaru osmičky a druhým (Microassembly Challenge) je uspořádání trojúhelníkových objektů, pomocí robota, do určitého tvaru. Z technických a časových důvodů jsme se zaměřili pouze první úkol. To však naštěstí k účasti v soutěži postačuje.

Základní podmínkou účasti v soutěži bylo vyrobit své vlastní miniaturní herní pole dle předloženého nákresu 4.1(a) a dodržet veškeré tolerance, ať už jde o velikost herního pole nebo sílu čáry. V tomto poli se má pohybovat mikroskopický robot, tak aby projel všemi brankami v následujícím pořadí [1;2;3;4;1]. Jde tedy o dráhu v podobě osmičky. Rozměry robota musí být takové, aby v žádném směru nepřesáhl krychli o hraně $a = 500 \,\mu\text{m}$. Přičemž celkový časový limit na projetí dráhy jsou dvě minuty. Důležité také je, aby robot cestou nikde nepřekročil hranice pole.

4.2. Výroba soutěžního elektrodového pole

Naše stávající čtyřsektorové elektrodové pole bohužel nevyhovuje zadání soutěže. Bylo proto nutné navrhnout nové soutěžní elektrodové pole, které by zadání vyhovovalo. Stáli jsme tedy před problémem, jak a kde takové pole vyrobit. Bylo třeba vyrobit jednak elektrodové pole, které by umožňovalo pohyb vyhovující zadání a dále hranice herního pole dle obrázku 4.1(a). Hranice bylo možné na pole jen nakreslit nebo i mechanicky vytvořit. To by mělo výhodu, že bychom nemohli porušit pravidlo překročení bariéry, avšak konstrukce takového mechanického prvku by byla poměrně obtížná. Například středový díl mezi dvěmi brankami má podstavu velikosti pouhých $50 \times 500 \,\mu\text{m}$ a musel by téměř viset ve vzduchu.

První verze elektrodového pole, kterou jsme se rozhodli vyrobit u našich partnerů v Ústavu analytické chemie AV v Brně, byla opět technologie zlatých elektrod na skleněné destičce. Elektrodové pole jsem nakreslil v Autocadu. Rozměrově odpovídá mikroskopovému sklíčku 76×25 mm, na kterém bude vyrobeno. Rozteč elektrod je taková, aby šlo zasunout do běžně dostupného konektoru na mini PCI a nebylo nutné dále improvizovat s kontaktováním pole. Elektrody budou vyrobeny ze zlata a podkladu z ITO¹. Obrys herního pole bude vytvořen z neodmytého fotorezistu.

Výrobní postup je následující. Na sklíčko se nejprve nanese fotorezist. Ten se osvítí na litografu a osvícené části se odmyjí. Následně se na sklíčko nanáší tenká vrstva ITO, kvůli jeho dobré přilnavosti a na ni vrstva zlata silná asi 80 nm. Další postup je takový, že se rozpustí zbylý fotorezist i s vrstvou zlata na něm. Na skle poté zbydou vodivé cesty jen v původně osvícených místech.

Bohužel ani důkladná příprava a návrh pole pro zasunutí do konektoru nezabránila problémům s kontaktováním. Prvním problémem bylo, že nám v Brně vyrobili elektrody na poli o něco kratší. Museli jsme proto sklíčko naříznout diamantovým perem a z každé strany kousek odlomit.

Navíc se ukázalo, že při zasouvání pole do konektoru se elektrody poškodí. Upravil jsem tedy konektory tak, aby se do nich sklíčko zasunulo bez kontaktu s pružinkami a teprve potom na ně bylo kolmo přitisknuto. Tento postup zajistí, že se elektrody ani po opakovaném vložení do konektoru nepoškodí.

První pokusy ukázaly, že všechny elektrody fungují. Na obrázku 4.2 můžeme vidět celou aparaturu.

 $^{^1\}mathrm{ITO}$ (Indium tin oxide) - Materiál k výrobě průhledných elektrod např. na LCD displejích.



Obrázek 4.1.: Elektrodové pole pro soutěž: (a) Zadané parametry pole [3] , (b) výkres herního pole vytvořený v autocadu, (c) pohled skrz objektiv kamery

4. Soutěž mikrorobotů MMC



Obrázek 4.2.: Sestavená aparatura pro účast v soutěži

5. Návrh řízení

Teoreticky se nabízí několik způsobů řízení pohybu kuličky na elektrodovém poli. Každý z nich odpovídá jinému typu dielektroforézy. Máme-li dané materiály pro pohybující se předmět i prostředí, omezí nás to pouze na typy dielektroforézy, které jsou pro danou kombinaci možné. V našem případě to bylo opačně. Zvolili jsme si strategii řízení a podle té jsme volili materiál pro kuličku. V této kapitole tedy nejprve stručně popíši většinu možných strategií řízení s jejich výhodami a možnostmi využití. V další části poté rozvedu ty metody, které se nám na naší platformě osvědčili.

5.1. Možné strategie řízení

5.1.1. Řízení pomocí pozitivní dielektroforézy

Jde o nejjednodušší a zároveň nejsnáze pochopitelný způsob řízení. Můžeme ho samozřejmě použít pouze pro kombinace prostředí a předmětů, ve kterých dochází k pozitivní dielektroforéze. Máme-li soustavu elektrod a na jednu z nich přivedeme odlišný potenciál od všech ostatních, bude předmět přitahován k této elektrodě vlivem vysokého gradientu na její hraně. To má jednu nespornou výhodu. Kulička má v místě elektrody stabilní polohu a řízení je proto velmi snadné. K řízení tímto způsobem se obvykle využívá modulace napětí přiváděných na elektrody. Nevýhodou v tomto případě může být umístění elektrod na dno pole, jako je tomu v našem případě. Výslednice dielektroforetické a gravitační síly bude potom mířit ve většině míst směrem dolů viz obrázek 2.5(b) a předměty budou mít tendenci uvíznout na dně. Tento problém by bylo možné vyřešit například umístěním elektrod navrch bazénku s kuličkami.

5.1.2. Řízení pomocí negativní dielektroforézy

Negativní dielektroforézou můžeme dosáhnout zcela opačného efektu než v předchozím případě. Kulička bude tentokrát od elektrody s odlišným potenciálem odpuzována. Z toho plyne, že nebude mít v žádném místě stabilní polohu, ale vzdálí od zapnuté elektrody do míst, kde již je dielektroforetická síla natolik slabá, že nestačí k pohybu s kuličkou. To ale platí pouze pro jednu zapnutou elektrodu. Na rozhraní více elektrod je možné přivedením vhodných potenciálů vytvořit jakési lokální minimum. Kulička bude poté z blízkého okolí sklouzávat do lokálního minima na rozhraní elektrod. Tento způsob řízení je však omezen pouze na místa, kde se stýká více elektrod.

5.1.3. Řízení pomocí dielektroforézy postupnou vlnou

Předchozí dva případy se řadí mezi mezi konvenční dielektroforézu. Dielektroforéza postupnou vlnou má však poměrně odlišné vlastnosti. K jejímu vyvolání potřebujeme přivést na elektrody alespoň tři fázově posunuté signály. Potom se objeví efekt, že indukovaný dipól má vůči vnějšímu elektrickému poli fázové zpoždění a díky tomu i odlišný směr. Působením elektrického pole na takto pootočený dipól vzniká točivý efekt podobně, jako uvnitř asynchronního motoru. Točivý efekt však není jediným projevem. Pokud například přivedeme na řadu elektrod signály o fázích [0° 90° 180° 270°] dosáhneme takzvané postupné vlny, kdy se předměty začnou pohybovat ve směru gradientu fáze napříč přes elektrody.

Využití dielektroforézy postupnou vlnou bylo jednou z našich původních motivací. S ohledem na to byl navržen i náš generátor, uzpůsobený pro generování fázově posunutých signálů. Bohužel v praxi se nám tato metoda příliš neosvědčila, jelikož při provedených experimentech docházelo k pohybu vody a kuličky byly unášeny proudem. To jsme si ověřili při jednom z prvních pokusů, kdy se kuličky beze změny pohybovaly i přes nefunkční elektrody. Navíc mají kuličky tendenci držet se na hranách elektrod a proudem jsou strženy jen občas. Z časových důvodů jsem metodu řízení postupnou vlnou dále nerozpracoval. Jistě by si však v budoucnu zasloužila více pozornosti.

5.2. Použitá strategie řízení

Pro náš případ se nám nejlépe osvědčila konvenční negativní dielektroforéza. Používáme polystyrénové kuličky o velikostech od 10 do 250 μ m, protože právě na ně působí v deionizované vodě negativní dielektroforéza. Přestože náš generátor byl primárně navržen pro řízení postupnou vlnou, ukázal se být vhodným i pro konvenční dielektroforézu. Není sice možné měnit amplitudu generovaných signálů, avšak změnou fázového rozdílu se mění efektivní doba působení dielektroforézy, což má velmi podobný význam. Např. efekt "zapnutí" jedné elektrody vytvoříme tak, že na této elektrodě nastavíme fázi 8 a na všech ostatních 0 (odpovídající fázové posuvy jsou v tabulce 3.1). Navíc má toto řízení výhodu, že pro jakoukoliv kombinaci fází zůstává vždy střední hodnota nulová a nevzniká elektrolýza vody.

Při návrhu řízení jsem provedl sérii pokusů, ze kterých se mi podařilo vypozorovat jisté zákonitosti. Především pokud je zapnutá pouze jedna až dvě elek-



Obrázek 5.1.: Dva základní principy řízení: (a) Odpuzování od míst s velkým fázovým rozdílem , (b) přitahování ke společné fázi

trody, je docela snadné odhadnout, kam se budou kuličky pohybovat. V místech, kde se však stýká více elektrod a na každou je možné přivést odlišnou fázi, je již velice obtížné odhadnout směr pohybu. V zásadě jsem vypozoroval dvě zákonitosti, které napomáhají jisté představě dějů nad elektrodovým polem. V první řadě platí, že čím větší je fázový rozdíl mezi dvěmi elektrodami, tím více je z jejich rozhraní kulička odpuzována viz obrázek 5.1(a). Druhý efekt je, že pokud má většina elektrod společnou fázi, budou kuličky směřovat spíše k těmto elektrodám, než k ostatním. Důsledek tohoto jevu ilustruje obrázek 5.1(b). Na levé straně pole se střídají elektrody o fázích 0 (bílá) a 8 (červená). Všechny ostatní elektrody mají fázi 0. Kuličky v levé části pole se v tomto případě shromáždí nad bílými elektrodami, které mají stejnou fázi s elektrodami ve zbytku pole.

5.3. Projetí osmičky na herním poli

Za pomoci těchto dvou základních principů již je možné sestavit základní abecedu pohybů. Vzhledem k tomu, že naším hlavním cílem bylo projetí osmičky na herním poli uvedu zde všechny strategie, které jsme k tomu potřebovali. Souhrnně platí, že s kuličkou je možné pohybovat buď napříč přes elektrody, nebo podél jejich rozhraní. Celou dráhu je tedy nutné sestavit z těchto pohybů.



Obrázek 5.2.: Vertikální pohyb

5.3.1. Vertikální pohyb

Pro vertikální pohyb napříč přes elektrody jsem s výhodou použil způsobu odpuzování od zapnuté elektrody viz obrázek 5.2. Naznačený pohyb je velmi jednoduchý a také rychlý a pro tento případ se nanejvýš hodí.

5.3.2. Pohyb po diagonále

Při pohybu po diagonále je třeba udržet kuličku na rozhraní elektrod. Toho je možné dosáhnout vytvořením lokálního minima v potřebném místě. K vytvoření minima se nejlépe osvědčil postup vyznačený na obrázku 5.3. Ten je kombinací obou principů z obrázků 5.1. Kulička je zároveň odpuzována od dvojic elektrod s fázovým rozdílem a zároveň má tendenci držet se u elektrod, které mají společnou fázi s většinou ostatních. Výsledkem toho je vytvoření jakéhosi lokálního minima dielektroforetické síly v místě rozhraní dvojice bílých elektrod s fází 0 viz obrázek 5.3. Největší fázový rozdíl je mezi zelenou a modrou elektrodou. Od těchto míst budou také kuličky nejvíce odpuzovány.

Pozvolným posouváním lokálního minima docílíme, že kulička uvnitř tohoto minima se pohybuje spolu s ním. Tento způsob pohybu má výhodu, že ho lze použít obousměrně narozdíl od většiny ostatních metod. Bohužel ho však nelze použít pro přechod přes střed pole. To je třeba vyřešit zvlášť viz obrázek 5.4.

5.3.3. Průchod brankou

Při průchodu brankou je opět třeba udržet kuličku v lokálním minimu na rozhraní elektrod. Zároveň však nelze použít zcela stejný postup, jako v minulém případě, při pohybu po diagonále. Přesunutí kuličky k sousední elektrodě musí být rozděleno na dva kroky, aby byl definován směr směr pohybu kuličky. Postup, umožňující tento pohyb, ilustruje obrázek 5.5.



Obrázek 5.3.: Pohyb po diagonále



Obrázek 5.4 .: Přechod přes střed pole

5.3.4. Sestavení celé dráhy

Pro účely řízení kuličky po dráze ve tvaru osmičky jsem v Matlabu vytvořil velmi jednoduchou utilitu. Ta sestává ze seznamu potřebných kroků, mezi kterými se přepíná manuálně stiskem klávesy. Celkem je k projetí této dráhy potřeba přibližně 80 kroků. I s takto jednoduchou strategií dosahujeme průměrného času okolo 33 vteřin. Na obrázku 5.6 je vidět naznačené projetí celé dráhy dle zadání soutěže.

5.4. Řízení na čtyřsektorovém poli

Navržený způsob řízení pro čtyřsektorové elektrodové pole je ještě jednodušší než předchozí případ. Z topologie pole vyplývá, že dráhu mezi libovolnými body na čtyřsektorovém poli je možné sestavit z pohybu napříč elektrodami a pohybu po diagonálním rozhraní. Obě tyto strategie již byly popsány v minulé kapitole. Pro



Obrázek 5.5.: Průchod brankou

příčný pohyb je využito odpuzování od zapnuté elektrody a diagonální pohyb je realizován pomocí posouvání lokálního minima.

5.5. Praktické poznatky

Během experimentů jsem se setkal s různými problémy, v oblasti řízení. Prvním z nich je, že po určité době se kuličky přestávají hýbat. Je potom třeba vyměnit vodu v bazénku za čerstvou. Tento jev nastává přibližně za hodinu. Je možné, že je to způsobeno pouhým ohřátím vody. Generátor se totiž při delším provozu výrazně zahřívá a časem ohřeje i elektrodové pole s vodou. Při jednom z pokusů jsem si všiml, že poté, co jsem vše nechal vychladnout, začaly se kuličky pohybovat o něco lépe.

Dalším drobným problémem je, že kuličky se mají tendenci přilepit na dno. Zjistil jsem, že tento jev lze částečně omezit opatrným očištěním elektrod. To bohužel může vést k poškození herního pole vyrobeného z fotorezistu. Jako řešení se ukázalo použití větších kuliček. Původní 50 μ m kuličky jsme nahradili kuličkami o velikosti 250 μ m. Ty se nepřilepují na dně a navíc je jejich pohyb daleko stabilnější.

V neposlední řadě také záleží na nastavené frekvenci. Naše použitelné frekvenční pásmo je však poměrně omezeno. Při frekvencích v řádu jednotek kHz už vzniká elektrolýza vody a shora je frekvence omezena asi na 1 MHz, kdy již nestačí koncový stupeň s darlingtonovými tranzistory a pull-up rezistorem. Přemýšlíme proto o návrhu jiné verze generátoru, která by měla na výstupu místo darlingtonu gate-driver pro MOSFET tranzistory. Tato součástka má pro náš účel velmi výhodné vlastnosti. Je určena pro buzení kapacitní zátěže na vysokých frekvencích napětím až 18 V, což je přesně to, co bychom pro naši platformu potřebovali.



Obrázek 5.6.: Projetí soutěžní dráhy v čase 33 vteřin. Obrázek vznikl složením posloupnosti snímků z kamery.

6. Závěr

V průběhu této práce jsem úspěšně splnil všechny body zadání. Spolu se členy týmu spolupracujícího na tomto problému se nám podařilo oživit celou aparaturu. Já jsem provedl oživení generátoru a ostatní vytvořili software k jeho ovládání. Pro kontaktování elektrodového pole jsem navrhl novou metodu využívající miniaturní pozlacené pružinky z konektoru pro mini-PCI. Původní čtyřsektorové elektrodové pole se mi nepodařilo nakontaktovat zcela bezchybně, jelikož stále nefunguje jedna elektroda. I přes to jsem na sestavené aparatuře provedl sérii pokusů, ze kterých jsem posléze čerpal při návrhu řízení.

Za účelem účasti v soutěži mikrorobotů NIST MMC 2012 jsem navrhnul nové elektrodové pole, které vycházelo z původního čtyřsektorového pole, ale jeho rozměry odpovídali zadání soutěže. Podklady pro výrobu jsem nakreslil v Autocadu a pole jsme nechali vyrobit na mikroskopovém sklíčku v Ústavu analytické chemie AV v Brně.

Pro toto elektrodové pole jsem dále navrhoval řízení, které odpovídalo možnostem již zkonstruovaného generátoru. Zadáním soutěže bylo projet všemi brankami herního pole v zadaném pořadí viz obrázek 4.1(a). Navrhl jsem tedy velmi jednoduché řízení sestávající ze série přednastavených kroků, mezi kterými se přepíná stiskem klávesy. Přestože je toto řízení zcela jednoduché, obsadili jsme v letošním kole soutěže čtvrté místo z devíti soutěžících týmů. Vzhledem k tomu, že jsme se soutěže zúčastnili poprvé, narozdíl od většiny ostatních týmů, jde o poměrně dobrý výsledek.

Nutno však dodat, že máme stále co zlepšovat. První věcí, která by dané úloze výrazně pomohla, je zavedení zpětné vazby přes rozpoznávání obrazu z kamery. Tím by bylo možné výrazně zvýšit rychlost a omezit nebezpečí, že kulička unikne z lokálního minima. Dalším krokem, který by stál za vyzkoušení je úprava generátoru pro dosažení vyšší frekvence. Doposud jsme byli omezeni na frekvence do 3 MHz ale některé efekty by mohly nastávat až při vyšších frekvencích. Například zlomová frekvence, kdy začne převládat kapacita nad vodivostí je pro vodu přibližně 1 - 10 MHz.

Literatura

- T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*. Cambridge University Press, 1995.
- [2] "Electromagnetic fields and energy." http://ocw.mit.edu/resources/res-6-001-electromagnetic-fields-and-energy-spring-2008/.
- [3] NIST MMC, "Official rules," 2012.
- [4] T. Jones, "Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation," Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, vol. 22, p. 33–42, Dec. 2003.
- [5] U. Lei and Y. Lo, "Review of the theory of generalised dielectrophoresis," Nanobiotechnology, IET, vol. 5, p. 86 –106, Sept. 2011.
- [6] R. Pethig, "Review Article—Dielectrophoresis: status of the theory, technology, and applications," *Biomicrofluidics*, vol. 4, no. 2, pp. 022811–022811– 35, 2010.
- [7] M. P. Hughes, Nanoelectromechanics in Engineering and Biology. CRC Press, 1 ed., 2002.
- [8] "Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady 2/3 richard phillips feynman | databáze knih." http://www.databazeknih.cz/knihy/feynmanovyprednasky-z-fyziky-s-resenymi-priklady-2-3-44652.

A. Obsah přiloženého CD

- generator_documents\ Firmware, PCB a dokumentace generátoru
- Matlab\ Použité skripty v Matlabu
- text
\ Bakalářská práce ve formátu PDF
- video
\ Videa pořízená v průběhu práce